

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Medida de espesor interno en estructura tipo
sándwich utilizando termografía infrarroja
activa**

**(Internal thickness measurement in sandwich
structure using active infrared thermography)**

Para acceder al Título de

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de la Luz

Autor: Daniel Ignacio Chirinos Irahola

Septiembre-2021

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi familia, que me apoyaron en todo momento en mis estudios de máster. Gracias por el ánimo de estudiar en el extranjero, a pesar de la pandemia, que me motivaron a seguir luchando por mis objetivos de vida.

Agradecer a mi director Francisco Madruga, por brindarme la ayuda y experiencia que me permitió comprender los conceptos que dieron frutos al presente trabajo.

Finalmente, agradecer a la Fundación Carolina por brindarme la oportunidad en vivir la experiencia de estudiar en España y permitir de adquirir un mayor conocimiento que me servirá para mi futuro.

Resumen

En el trabajo presente trata de medir el espesor del caucho en una estructura tipo sándwich en el cual el caucho está rodeado por capas de acero, esta estructura pertenece a un sistema cerrado. Para la medición se opta con el método de termografía activa infrarroja, se trata de aplicar una técnica de calentamiento o enfriamiento para variar el equilibrio térmico de la pieza. Las variaciones de temperatura de la pieza en estudio, brinda el comportamiento termográfico de los materiales que compone la pieza, tanto en la parte de calentamiento como el de enfriamiento. Las respuestas que entregue la pieza, serán útiles para medir el espesor del caucho debido a la conductividad y difusividad del material. Pero, no es suficiente capturar las señales infrarrojas para obtener el espesor, porque puede entregar una mala interpretación o posiblemente señales que no sea posible deducir, por tanto se realiza un procesado de la señal tanto en calentamiento como en enfriamiento, donde la función es resaltar la respuesta de los materiales involucrados a la excitación y al enfriamiento, además de facilitar la interpretación de las señales resultantes para la obtención de valores que contribuyen a la medida del espesor del caucho.

ÍNDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Problema | 1 |
| 1.2 | Solución | 2 |
| 1.2.1 | Ultrasonidos..... | 2 |
| 1.2.2 | Líquidos Penetrantes..... | 3 |
| 1.2.3 | Tomografía de Coherencia Óptica (OCT) | 4 |
| 1.2.4 | Radiografía Industrial..... | 5 |
| 1.2.5 | Corrientes Inducidas..... | 6 |
| 1.2.6 | Inspección por Termografía Infrarroja..... | 6 |
| 1.3 | Objetivos | 7 |
| 1.3.1 | Objetivo General..... | 8 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 8 |
| 2 | Fundamentos Teóricos..... | 9 |
| 2.1 | Termografía Infrarroja | 9 |
| 2.2 | Radiación Infrarroja | 11 |
| 2.2.1 | Ley de Planck..... | 11 |
| 2.2.2 | Ley de Stefan-Boltzmann | 13 |
| 2.3 | Fundamentos del Calor | 14 |
| 2.3.1 | Conductividad Térmica | 14 |
| 2.3.2 | Difusividad Térmica | 15 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4 | Termografía Activa. Tipos | 16 |
| 2.4.1 | Termografía Pulsada | 16 |
| 2.4.2 | Termografía Escalonada (Step-Heating) | 17 |
| 2.4.3 | Termografía Lock-In | 18 |
| 2.4.4 | Vibrotermografía | 19 |
| 2.5 | Sensores Infrarrojos | 20 |
| 2.5.1 | Cámaras Termográficas | 21 |
| 2.6 | Procesados para Secuencias Termográficas | 23 |
| 2.6.1 | Reconstrucción de Señales Termográficas (TSR) | 24 |
| 3 | Desarrollo de la Solución Propuesta | 26 |
| 3.1 | Fuentes de Excitación | 28 |
| 3.1.1 | Excitación Láser Puntual | 29 |
| 3.1.2 | Excitación Láser Lineal | 30 |
| 3.1.3 | Fuente de Excitación a Implementar | 30 |
| 3.2 | Cámara Termográfica Utilizada | 31 |
| 4 | Medidas, Resultados y Discusión | 33 |
| 4.1 | Medidas..... | 33 |
| 4.2 | Resultados | 37 |
| 4.2.1 | TSR para un Pulso Promedio | 41 |
| 4.2.2 | Aplicación de Derivadas a los Resultados Provenientes del TSR | 50 |
| 4.2.3 | Medida del Espesor del Caucho | 55 |

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 4.3 | Discusión de Resultados..... | 56 |
| 5 | Conclusiones y Futuros Trabajos | 59 |
| 6 | Bibliografía | 60 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

La suspensión neumática es un soporte de carga en cada eje del automotor. Tiene una bolsa de aire presurizada, su fabricación se basa en cuerdas de alta resistencia y envueltas en caucho. La combinación del compresor, amortiguadores y bolsas, todos en base de aire, contribuyen al control de la sensación de suspensión [1]. El sistema debe hacer vacío para cumplir su función, en caso de tener una fuga de aire porque daña el compresor.

En la figura 1 en la parte A, se observaría un corte, visualizando la parte interior del sistema de suspensión neumática, al enfocar en la parte superior de la pieza, donde se muestra en la parte B de la figura 1, se tiene una estructura tipo sándwich de la pieza donde los materiales que componen son acero, caucho, acero, esta parte de la pieza es fundamental porque evita la entrada o fuga de aire del sistema. El caucho que está envuelto con el acero, y su espesor debe medir entre 3 a 4 mm. Si las medidas son mayores a lo mencionado, el acero no podrá ajustar el caucho pero, si las medidas son menores, el ajuste del acero dañará el caucho, ambas posibilitarán una fuga o entrada de aire.

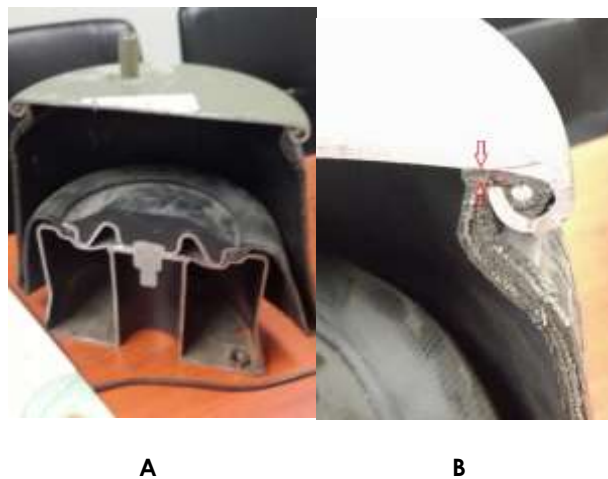


Figura 1: Tambor de la suspensión neumática. La parte A es el interior que contiene el tambor. La parte B es la estructura sándwich (acero-caucho-acero), esta no debe tener fugas de aire para no afectar el funcionamiento de la suspensión

La entrada de aire al interior de la pieza afecta de manera negativa al funcionamiento de la misma, dañando el sistema por completo, por lo que es importante que el caucho de la pieza, mostrada en la parte B de la figura 1, tenga el espesor correcto. La única forma de obtener el espesor de la pieza, es consultar los datos proporcionados por el fabricante, pero no se tiene un

método en el cual se puede comprobar el espesor del caucho indicado en los datos de referencia. Por tanto, se debe buscar un método o técnica en el cual indique el espesor del caucho en tiempo real durante la fabricación de la pieza. Destacar que la pieza es cerrada, por lo cual no se tiene acceso a una visual en toda la pieza.

1.2 Solución

Para aplicar algún método para obtener el espesor del caucho de la estructura tipo sándwich, el tambor de la suspensión neumático debe permanecer intacto sin modificar o dañar la estructura, por lo que se debe aplicar ensayos no destructivos (NDT en sus siglas en inglés), para su aplicación.

La prueba no destructiva es el proceso de inspeccionar, probar o evaluar materiales, componentes o ensamblajes para detectar discontinuidades o diferencias en las características sin destruir la capacidad de servicio de la pieza o sistema. En la actualidad, las pruebas no destructivas modernas se utilizan en la fabricación y las inspecciones en servicio para garantizar la integridad y confiabilidad del producto, controlar los procesos de fabricación, reducir los costos de producción y mantener un nivel de calidad uniforme [2]. NDT están basados en diferentes en principios físicos y los resultados son de interpretación a partir de la información proporcionada por el método seleccionado. La interpretación es trascendente porque las indicaciones proporcionadas por el método seleccionado son en función a los principios físicos y del propio material ensayado [3].

Se presentan varias técnicas de NDT, y estas evolucionan de forma continua gracias al avance de nuevas tecnologías y descubrimientos de nuevas técnicas y procedimientos. Por tanto, la ciencia y tecnología de los NDT están en constante progreso y se necesita un mayor conocimiento específico [4].

1.2.1 Ultrasonidos

Son ondas sonoras en cual la frecuencia es superior a los 20 KHz, este valor alto permite una buena penetración del material. Cuando las ondas sonoras se propagan de un medio a otro, una parte de la energía sonora se refleja y el resto se transmite en la interfaz que separa los dos medios, esto se puede observar en la figura 2. Esta propiedad se utiliza para detectar fallas porque estas pueden reflejar la energía del sonido ultrasónico, además de las interfaces. La interacción de la energía sonora es más fuerte para frecuencias más altas. Por lo tanto, los ultrasonidos de alta frecuencia en el rango de frecuencia de 0,5 MHz a 25 MHz se consideran

adecuados para la prueba [5]. Las ondas sonoras de alta frecuencia son muy direccionales y viajarán a través de un medio (como una pieza de acero o plástico) hasta que encuentren un límite con otro medio (como el aire), momento en el que se reflejan de regreso a su fuente. Al analizar estos reflejos, es posible medir el grosor de una pieza de prueba o encontrar evidencia de grietas u otros defectos internos ocultos [6].

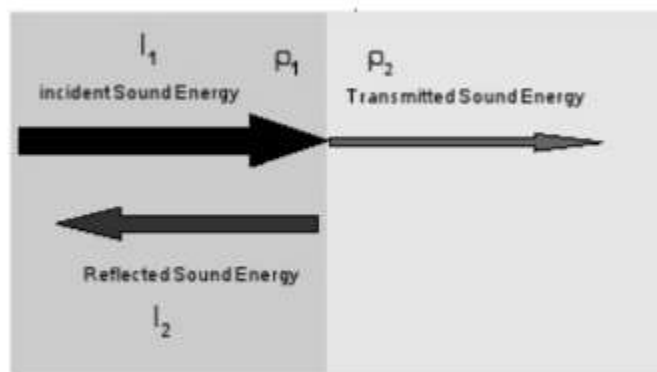


Figura 2: Propagación de la energía de sonido [5]

La inspección por ultrasonidos tiene inconvenientes al momento de obtener el espesor del caucho, el primero es por la atenuación del material que probablemente evite llegar al otro extremo del caucho, para solucionar el inconveniente se debe seleccionar la frecuencia ideal, el cual se obtiene mediante el estudio de la rigurosidad y la velocidad de propagación del material [7, 8], pero para observar la rigurosidad del caucho se debe realizar una inspección no destructiva adicional y la velocidad de propagación se extrae los datos del fabricante. Otro inconveniente con el método presentado, es la operación del mismo, porque se necesita experiencia y mano de obra calificada. Por tanto, por la complejidad que presenta la inspección de ultrasonidos, no es posible aplicar para obtener el espesor del caucho.

1.2.2 Líquidos Penetrantes

El método de líquido penetrante se basa en el principio de capilaridad de los líquidos y se emplea para detectar discontinuidades abiertas a la superficie [4]. Los líquidos utilizados son tintes visibles y fluorescentes. Estos líquidos deben penetrar aberturas muy finas, permanecer en aberturas relativamente gruesas, tener buena humectabilidad y ser fácilmente removido de la superficie después de la prueba. También debe ser inerte con respecto a los materiales que se están probando, no ser tóxico, tener un alto punto de inflamación y ser relativamente económico.

La prueba de líquidos penetrantes no es un método aceptable con materiales muy porosos. Los defectos del subsuelo pueden actuar como reservorios para el penetrante y se puede obtener alguna indicación de esto si se nota un "sangrado" (se refiere a la absorción del tinte penetrante por el revelador) excesivo después de aplicar el revelador [9].

El método no es una solución ideal para determinar el grosor del caucho en el tambor de la suspensión neumática, porque la técnica solo determina si hay fallas en el material y en superficie. Esto puede posibilitar a determinar fallas en la parte superficial del acero de la pieza en estudio.

1.2.3 Tomografía de Coherencia Óptica (OCT)

OCT es un método de obtención de imágenes de alta resolución puramente óptico, no destructivo, no invasivo y sin contacto, que permite la adquisición de datos de imágenes con resolución de profundidad en una, dos o tres dimensiones de regiones subterráneas in situ y en tiempo real. OCT es una técnica de diagnóstico establecida para aplicaciones de biomedicina y ciencias biológicas avanzadas. OCT se basa en el fenómeno físico de la interferometría de luz blanca (WLI) y emplea fuentes de luz especiales con alta coherencia espacial pero baja coherencia temporal. En un sistema de detección interferométrica, una longitud de coherencia tan corta actúa como un filtro temporal con respecto a los tiempos de llegada de los fotones retrodispersados. El contraste de la imagen se debe a la falta de homogeneidad en el índice de refracción del material de muestra y, por lo tanto, la OCT proporciona información complementaria a otras técnicas de imágenes de alta resolución como la ecografía, la tomografía computarizada de rayos X (TC) y la resonancia magnética (MRI) [10].

Las características que destaca el OCT son la alta resolución hasta el orden de micrómetros y una buena relación señal/ruido. Estas características no solo son de gran importancia para la biomedicina en la obtención de imágenes y diagnósticos in vivo, también permite el estudio en aplicaciones industriales, como la visualización de los defectos, la composición del material o el estudio de capas de un cierto material. Según [10], [11] y [12], se realizaron estudios en diferentes materiales, por ejemplo, cerámica, polímeros, contaminación del agua, los envases para alimentos, entre otros; lo común de los estudios realizados, es la profundidad, ya que el equipamiento OCT llega a la orden de micrómetros hasta unos pocos milímetros. El método seleccionado para el estudio de la estructura sándwich, debe capturar imágenes a una profundidad en el orden de milímetros, por tanto el método OCT queda descartado.

1.2.4 Radiografía Industrial

La radiografía industrial es un método de inspección de materiales en busca de defectos ocultos mediante el uso de la capacidad de rayos X cortos, rayos gamma y neutrones para penetrar varios materiales. Puede identificar grietas o fallas que de otro modo no serían visibles [13]. En la figura 3, se observa la fuente de radiación penetrando un objeto en el cual se almacena en un detector de radiación (película).

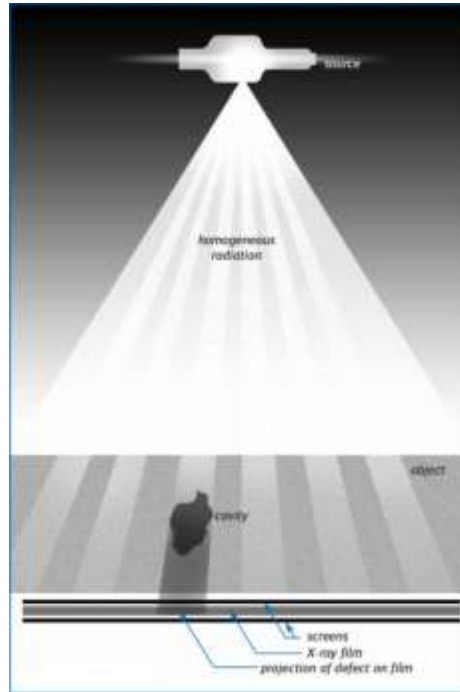


Figura 3: Configuración básica para radiografía de película [14]

El detector suele ser una hoja de película fotográfica, que se mantiene en un sobre o casete hermético a la luz que tiene una superficie frontal muy delgada que permite que la radiación, comúnmente rayos X, pase fácilmente. La fuente de radiación debe ser pequeña (alrededor de unos milímetros de diámetro), a medida que los rayos X viajan en línea recta desde la fuente a través de la muestra hasta la película, se forma una imagen nítida de la muestra y las discontinuidades. La nitidez de la imagen depende del diámetro de la fuente de radiación y su distancia de la superficie sobre la que se forma la imagen [14].

La principal desventaja es el alto costo y el impacto negativo a la salud del operador al manejar elementos radiactivos. Tiene limitaciones respecto al espesor máximo de material que es capaz de atravesar, en función de la energía utilizada y la densidad del material, y su aplicación puede requerir largos tiempos de exposición [4]. Al tratarse de un experimento, se realizan múltiples

pruebas para obtener los resultados esperados, por tanto el usuario estará en gran exposición radiactiva por lo que la solución queda descartada.

1.2.5 Corrientes Inducidas

La técnica NDT de corrientes inducidas, o Eddy-Current Testing (ECT), se basa en la interacción entre una fuente de campo magnético y el material de prueba. Los científicos pueden detectar la presencia de grietas muy pequeñas al monitorear los cambios en el flujo de las corrientes. Los resultados de las pruebas de corrientes inducidas son prácticamente instantáneos, mientras que otras técnicas como las pruebas de líquidos penetrantes o la inspección óptica son procedimientos que requieren mucho tiempo y hacen imposible inspeccionar toda la producción. Las pruebas de corrientes inducidas permiten la detección de grietas en una gran variedad de materiales conductores, ya sean ferromagnéticos o no ferromagnéticos, además no necesita ningún contacto físico directo entre el sensor y la pieza inspeccionada [15].

Su aplicación está limitada a materiales conductores eléctricos, siendo posible detectar únicamente defectos superficiales y sub-superficiales [4]. Por tanto, esta técnica no será útil para el problema porque las corrientes no detectarían el caucho de la pieza en estudio.

1.2.6 Inspección por Termografía Infrarroja

La inspección por termografía infrarroja, a diferencia de los otros métodos, presenta una adquisición de datos de manera segura, no intrusiva y sin contacto. Permite la detección de defectos en superficies grandes y de forma rápida (desde una fracción de segundo hasta unos minutos dependiendo de la configuración). Cualquier objeto por encima de la temperatura del cero absoluto emitirá radiación IR. La radiación infrarroja corresponde a la banda del espectro electromagnético entre 0,74 y 1000 μm . Por lo tanto, una excelente manera de medir las variaciones térmicas es usar un radiómetro IR, es con una cámara de matriz de plano focal (FPA) capaz de detectar radiación en las bandas infrarrojas de onda media (3 a 5 μm) o larga (8 a 14 μm), denotado como MWIR y LWIR, respectivamente, correspondientes a dos de las ventanas atmosféricas de alta transmitancia como se muestra en la Figura 4 [16].

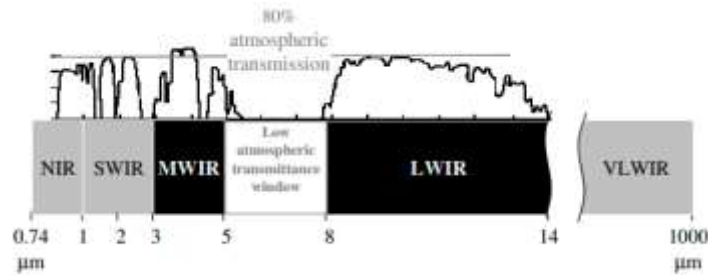


Figura 4: Bandas de infrarrojos en el espectro electromagnético y su transmitancia [16]

La técnica es útil y factible para resolver el problema descrito, porque puede obtener información de calor del caucho ya que esta técnica proporciona datos de la profundidad del material y superficie. Por tanto, el resultado que se tenga, servirá como interpretación para deducir el grosor del caucho de la pieza en estudio. Cabe destacar que se utilizará termografía activa para las pruebas porque el material podría no encontrarse a una temperatura superior al ambiente y entonces no radiaría calor. Más adelante del documento, se detallarán las diferencias entre la termografía infrarroja pasiva y activa.

1.3 Objetivos

Hoy en día, la tecnología avanza a pasos agigantados, gracias a ella se dio soluciones a muchos problemas cotidianos, científicos, entre otros; aunque no todos los problemas no están resueltos, la tecnología nos permite buscar opciones para desarrollar un plan en la cual se obtenga un avance a la posible solución. La termografía infrarroja activa, es una tecnología que fue evolucionando al pasar los años e impactó en las inspecciones de calidad en el ámbito de la industria. El elemento que tuvo más avance en el área, son los sensores infrarrojos, en el cual la resolución espacial llega al orden de megapíxel, capaces de medir varios grados bajo cero o grados de alta temperatura, altas velocidades de captura, entre otras características. Esta tecnología permitió establecerse como una de las técnicas en los ensayos no destructivos (NDT, en sus siglas en inglés) reconocida a nivel internacional, en el cual con un control de flujo de calor se obtiene una buena inspección de una pieza o material en estudio. La termografía activa infrarroja en NDT evolucionó a lo largo del tiempo, donde el margen de error es mínimo, la resolución va aumentando periódicamente, la tecnología de generación de calor es más preciso y más fácil controlar, y otras características que evolucionaron o están en desarrollo para una mejor inspección. Esta tecnología está a disposición del usuario porque el coste de fabricación es bajo lo que permitió una rápida expansión. La tecnología no solo avanzó en los dispositivos, también en la parte de software, que permite visualizar o interpretar los datos donde

el interfaz es simple para el usuario. Cada día hay avances de nuevos métodos para obtener los resultados deseados y los softwares son más sofisticados donde al paso del tiempo, el software tiene más herramientas de trabajo para una mejor interpretación o manipular los datos para otros trabajos investigativos, industriales, entre otros. Los softwares siguen evolucionando de acuerdo al requerimiento del usuario.

Con la tecnología descrita y nuestra disposición, el desafío del presente proyecto, es medir el espesor del caucho de una estructura sándwich de un sistema cerrado perteneciente a un sistema de suspensión neumática, por lo tanto, se describe el objetivo general y objetivos específicos en los siguientes apartados.

1.3.1 Objetivo General

"Determinar el espesor del caucho de una estructura tipo sándwich que forma parte del tambor de una suspensión neumática, mediante la técnica de termografía infrarroja activa"

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener imágenes infrarrojas mediante una excitación externa a la pieza de estudio, en el cual permita exportar datos para su debida modificación.
- Identificación de las curvas de calentamiento y enfriamiento partiendo de las imágenes infrarrojas, estableciendo una comparativa en el comportamiento de la pieza en dichos estados.
- Desarrollar un algoritmo que permite procesar las señales termográficas resultantes, buscando nuevos puntos de vista para interpretar de forma cuantitativa los nuevos resultados obtenidos.
- Analizar, evaluar y discutir los resultados del procesamiento de los datos provenientes de la aplicación de la termografía infrarroja activa a la estructura sándwich.

La estructura del trabajo completo, se presenta en los siguientes apartados, donde cada uno contribuirá a que se cumplan los objetivos descritos. En el apartado 2, se tienen los fundamentos teóricos, donde se conocerá el concepto de termografía activa infrarroja y los elementos que involucran para obtener resultados prometedores al utilizar este método. Los conceptos que se estudiarán este apartado ayudarán a entender mejor el procedimiento que se realizará a lo largo de este trabajo.

En el apartado 3, se trata del desarrollo de la solución propuesta, en el cual se propone diferentes formas para realizar la excitación a la pieza, además se presenta un esquema y materiales a utilizar para realizar la termografía activa infrarroja.

En el apartado 4, se presenta el procedimiento y los resultados parciales y finales que se obtuvo con el método de la termografía activa infrarroja, además se discute los resultados explicando el por qué el valor resultante y que interpreta.

Finalmente, en el apartado 5 se presentan las conclusiones de todo el procedimiento desarrollado.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se hará un recorrido a través del estado de arte sobre la termografía activa, además de los elementos y conceptos necesarios para entender su aplicabilidad al estudio de la estructura tipo sándwich de la suspensión neumática. Se comenzará con el apartado 2.1, que se introducirá con el concepto de termografía infrarroja, incluyendo sus ventajas e inconvenientes, en este mismo apartado se identifica las diferencias entre la termografía activa y pasiva, en el apartado 2.2 se introducirá los aspectos básicos de la radiación infrarroja. En el apartado 2.3, se explicará dos conceptos de fundamentos de calor esenciales para el estudio de la pieza y son la conductividad y difusividad térmica, que contribuirán a comprender que tan bien conduce el calor en un cierto material y a qué velocidad se propaga, además se detalla los valores de conductividad y difusividad del acero y el caucho. Con los conceptos ya detallados, se procede a explicar los elementos para realizar una termografía activa, en el apartado 2.4, se indica los tipos de termografía activa, donde se detalla las diferentes formas de estimulación de calor a un objeto de estudio y en el apartado 2.5, se explica los sensores infrarrojos elemento importante para la detección de señales infrarrojas. Por último, para cumplir con el objetivo principal se debe realizar un procesamiento de la señal, por tanto en el apartado 2.6, se explica diferentes procesados en el cual se seleccionará uno para su aplicación y se detallará el funcionamiento de este hacia las señales infrarrojas recibidas.

2.1 Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja (IRT en sus siglas en inglés) es una ciencia dedicada a la adquisición y procesamiento de información térmica de dispositivos de medición sin contacto, en el cual se basa en la radiación infrarroja. El ojo humano no puede ver este tipo de radiación. Por lo tanto,

se requieren dispositivos de medición por infrarrojos para adquirir y procesar esta información. Los dispositivos de medición infrarrojos adquieren la radiación infrarroja emitida por un objeto y la transforman en una señal electrónica.

Las principales ventajas de la tecnología infrarroja son las siguientes [17]:

- Es una tecnología sin contacto, porque los dispositivos utilizados no están en contacto con la fuente de calor
- Proporciona imágenes térmicas bidimensionales, que hacen posible una comparación entre áreas del objetivo.
- La captura de imágenes es en tiempo real, donde el objeto puede estar en estado estacionario o en movimiento capturando patrones térmicos que cambian rápidamente
- No tiene efectos de radiación dañinos, por lo tanto, es adecuado para un uso prolongado y repetido.
- Es una técnica no invasiva. Por lo tanto, no se entromete ni afecta al objetivo de ninguna manera.

La técnica también muestra inconvenientes, las cuales son [18]:

- Los diferentes valores de emisividad de la superficie dependen del material a estudiar.
- Perturbaciones en el contraste térmico debido a las pérdidas de calor por convección o radiación.
- La distancia entre el sensor IR y la pieza en estudio está limitado por la absorción de la radiación infrarroja.
- El pobre contraste y una SNR baja pueden provocar falsas alarmas
- Para tener un estudio completo del objeto, debe haber un calentamiento uniforme en toda el área de la misma. El calentamiento uniforme es dificultosa en generar.

Se emplean dos enfoques diferentes en IRT: Activo y Pasivo. El enfoque pasivo se define como la aplicación de la técnica sin un calentamiento (o enfriamiento) artificial / externo de la superficie ya que el contraste térmico es inherente a la medida [19]. El enfoque activo se aplica una técnica de calentamiento o enfriamiento, en el cual la pieza en estudio sale de su equilibrio térmico, debido a las variaciones locales en las conductividades térmicas y las capacidades caloríficas de la muestra, se producen diferencias de temperatura en la superficie en el proceso de calentamiento y enfriamiento y que son capturadas por una cámara termográfica [20].

2.2 Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja es la energía irradiada por la superficie de un objeto cuya temperatura está por encima del cero absoluto. La radiación emitida es función de la temperatura del material; cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la intensidad de la energía infrarroja emitida. Hay tres formas de disipar la energía radiante que golpea un objeto: absorción, transmisión y reflexión. Las fracciones de la energía radiante total que están asociadas con cada uno de estos modos de disipación se denominan absorptividad, transmisividad y reflectividad del cuerpo. Estos tres parámetros dependen de la longitud de onda. La suma de estos tres parámetros debe ser uno en cualquier longitud de onda como en la siguiente ecuación:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (1)$$

Donde α_{λ} es la absorptancia espectral, ρ_{λ} es la reflectancia espectral y τ_{λ} que es la transmitancia [17].

Todo cuerpo emite y absorbe radiación térmica de manera simultánea, de forma que la transferencia neta de calor se producirá desde el objeto de mayor temperatura hacia el de temperatura menor. La energía (Q), que incide sobre un cuerpo experimenta los procesos mencionados en la ecuación (1).

Los procesos que se producen por la radiación son complejos en una superficie cualquiera, para ello se define una superficie ideal, que se denomina cuerpo negro, y tiene las siguientes características [4]:

- Absorbe toda la radiación que incide sobre él
- Produce emisión máxima para todas las temperaturas
- Emisor difuso. La radiación emitida no depende de la dirección

El cuerpo negro sirve como referencia para definir el comportamiento de los demás cuerpos, simplificando el análisis de las transferencias energéticas por radiación. Para la estimación se rige por la ley de Planck [4].

2.2.1 Ley de Planck

Por definición, un cuerpo negro es un emisor difuso y Planck determinó el valor de la intensidad espectral del cuerpo negro y expresó su potencia emisiva espectral como:

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]} \quad (2)$$

Donde T es la temperatura del emisor en grados Kelvin y $C_1 = 2\pi h c_0^2$ y $C_2 = \pi c_0/k$ son constantes de radiación, es el cual h es la constante de Planck, k la constante de Boltzmann y c_0 es la velocidad de la luz en el vacío [4].

Aplicando la ecuación (2), se representa la potencia de emisividad espectral a diferentes temperaturas, mostrada en la figura 5.

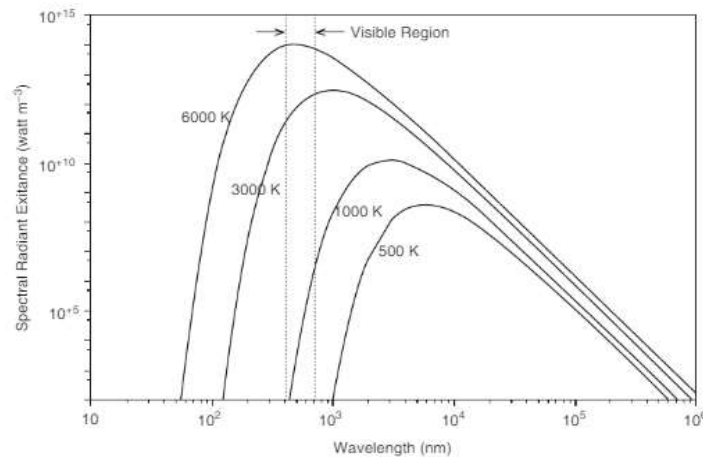


Figura 5: Potencia emisiva espectral del cuerpo negro para diferentes temperaturas [21]

Con la figura 5 y ecuación (2), se observan las siguientes características [4]:

- La radiación emitida varía con la longitud de onda de manera continua
- La radiación emitida es mayor cuanto mayor es la temperatura, para una longitud de onda concreta.
- Temperaturas por encima de 1000 K, la radiación emitida por un cuerpo negro está parcialmente en la región visible.
- Temperaturas por debajo de 800 K, la radiación emitida por un cuerpo negro está en la banda del infrarrojo.
- Cuanto mayor es la temperatura, más corta es la longitud de onda. La distribución es similar, pero la longitud de onda está desplazada. La longitud de onda máxima para un valor de temperatura específico se puede calcular utilizando la ley de Wien en la ecuación (3) [15].

$$\lambda_{pico} = \frac{0.0029}{T} \quad (3)$$

2.2.2 Ley de Stefan-Boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann permite calcular la potencia emisiva total del cuerpo negro, con la siguiente ecuación:

$$E = \sigma T^4 \quad (4)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Para relacionar el comportamiento de un cuerpo real con un cuerpo negro, se debe tomar en cuenta el parámetro de la emisividad de una superficie, que se define como el cociente entre la radiación emitida de una superficie real y la emitida por un cuerpo negro ambos se encuentran a la misma temperatura. Se define emisividad espectral hemisférica como el cociente entre la potencia emisiva espectral de un cuerpo real y la potencia emisiva espectral de un cuerpo negro, presentado en la ecuación (5).

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, n}(\lambda, T)} \quad (5)$$

La emisividad de las superficies reales tienen las siguientes características [4]:

- Depende de la naturaleza y el acabado de la superficie
- Depende del valor de la temperatura
- Normalmente tiene un valor pequeño en superficies metálicas
- Normalmente es un valor grande en materiales no conductores y aumenta este con la temperatura.

En caso de que la absorptividad es 1, a una temperatura constante, toda la energía absorbida debe volver a irradiarse (emitirse), de modo que la emisividad de tal cuerpo sea uno. Por lo tanto, la absorptividad en un cuerpo negro es igual a la emisividad. En general, de acuerdo con la ley de Kirchhoff, la emisividad y la absorptividad de cualquier material son iguales a cualquier temperatura y longitud de onda especificadas [17].

2.3 Fundamentos del Calor

2.3.1 Conductividad Térmica

La conductividad térmica se define en la capacidad de conducir la energía térmica en un determinado material, es influenciado en las siguientes características: Naturaleza de enlace de celosía y separación de enlaces, carácter atómico básico, imperfecciones, entre otros.

La energía térmica se transfiere de una molécula con mayor energía a sus adyacentes, esta acción es debido a la vibración entre las moléculas. El flujo de calor (W/m^2) conducirá a través del material si existe un cierto gradiente de temperatura (K/m) sobre el material [22].

En la figura 6, muestra el flujo de calor a una tasa dQ/dt a lo largo de una barra de sección transversal A de material. Además, se encuentra un gradiente de temperatura a lo largo de la barra, razón por la cual el calor fluye hacia abajo. A una distancia x del final de la barra, la temperatura es T y a una distancia $x + \delta x$ es $T + \delta T$. El calor fluye en dirección positiva, entonces δT debe ser negativo porque hay menos flujo de calor en la parte derecha de la barra. Por último, el gradiente de temperatura dT/dx es negativo, porque el calor fluye en dirección opuesta al gradiente de temperatura.

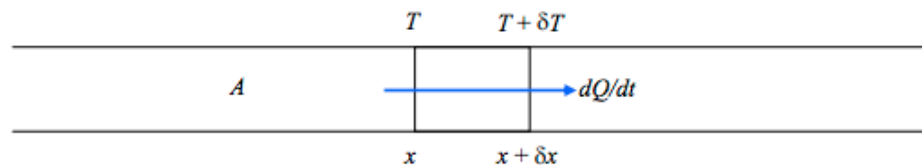


Figura 6: Flujo de calor a lo largo de una barra en sección transversal [23]

La relación entre la tasa de flujo de calor por unidad de área y el negativo del gradiente de temperatura se denomina conductividad térmica del material, en el cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Donde K es la conductividad térmica de un material en específico, donde las unidades son: $Wm^{-1}K^{-1}$ [23].

La pieza en estudio está formado por dos materiales que son: acero y caucho. La conductividad térmica del acero es de $46 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [24] y del caucho es de $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$ [25].

2.3.2 Difusividad Térmica

La difusividad térmica mide el cambio de temperatura producido en la unidad de volumen del material por la cantidad de calor que fluye en unidad de tiempo a través de una unidad de área de una capa de unidad de espesor con diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Este parámetro determina la velocidad de propagación del calor en el cuerpo en la vía de conducción. Depende de la conductividad pero también de la capacidad calorífica del material. Por tanto, un buen difusor térmico, como el Cu o el diamante, puesto en contacto con un depósito térmico caliente en el tiempo $t = 0$ alcanza su equilibrio térmico más rápido que los malos difusores como los polímeros o el vidrio. En la figura 7 [26] se representa la conductividad térmica frente a la difusividad térmica para una amplia variedad de materiales homogéneos: metales (círculos cerrados), cerámica (cuadrados), vidrios (triángulos), polímeros (cuadrados abiertos) y líquidos (círculos abiertos).

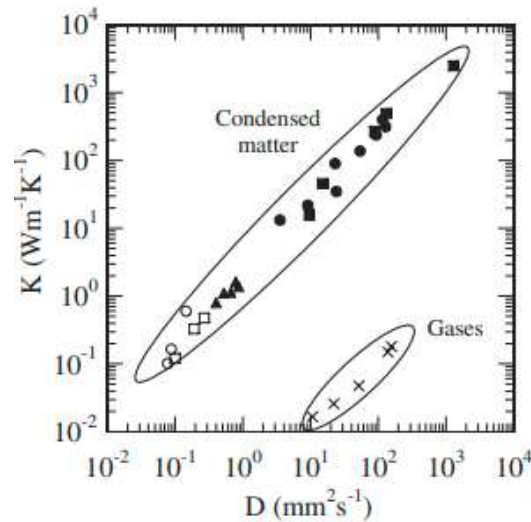


Figura 7: Conductividad térmica versus difusividad térmica para una amplia variedad de materiales homogéneos (círculos cerrados, metales; cuadrados, cerámicas; triángulos, vidrios; cuadrados abiertos, polímeros; círculos abiertos, líquidos; y cruces, gases). [26]

La conductividad térmica (K) y la difusividad térmica (D), no son cantidades independientes, pero están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{K}{\rho c'} \quad (7)$$

Donde ρ es la densidad (kg/m^3) y c' es el calor específico ($\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$).

Por lo general, los materiales con alta conductividad térmica también tienen una alta densidad, lo que limita la variabilidad de la difusividad térmica [26, 27].

Para la pieza en estudio, la difusividad térmica del acero es $13 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [24] y del caucho depende de la composición y la temperatura que está sometido el objeto, generalmente los valores son desde 0.089 a $0.13 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ [28].

2.4 Termografía Activa. Tipos

En la termografía activa, existen diferentes métodos para realizar el estudio el proceso de calentamiento y enfriamiento de la pieza en estudio, las cuales se indican en los siguientes subcapítulos.

2.4.1 Termografía Pulsada

Esta técnica de termografía activa, se basa en estimular la superficie del material en estudio, con un pulso corto y posteriormente se analiza la respuesta térmica del material [29]. A continuación se presenta las siguientes características [20]:

- El cambio de temperatura en función del tiempo
- La diferencia con un punto de referencia o una imagen de referencia
- El cambio de temperatura en el dominio de la frecuencia (amplitud y respuesta de fase)

El calor absorbido crea un frente térmico, donde su propagación puede verse alterada por cualquier defecto interno (variación de la conductividad térmica, etc...) en el material. Por otro lado, un área de la superficie que tenga un defecto interno debajo tendrá una temperatura más alta, con una evolución de la temperatura diferente a un material sin defectos. Esto se debe a la resistencia (menor difusividad térmica) al flujo de calor provocado por un defecto interno. Esta diferencia entre las temperaturas se puede observar con una cámara de infrarrojos. La figura 8 muestra el principio de funcionamiento básico de la termografía pulsada [30].

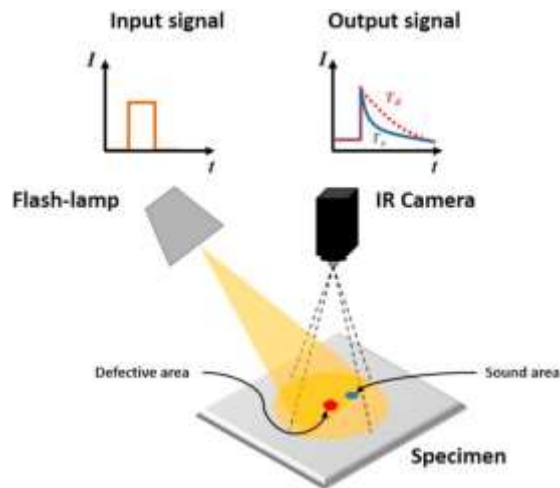


Figura 8: Principio de funcionamiento de la termografía pulsada [30]

2.4.2 Termografía Escalonada (Step-Heating)

A diferencia de la termografía pulsada, la termografía escalonada es el método que utiliza un pulso de calentamiento largo, por lo que para la estimulación térmica se utiliza una densidad de energía mucho menor. El calentamiento relativamente lento permite probar estructuras de múltiples capas y evaluar uniones entre las capas. Además, los cambios en la distribución de la temperatura de la superficie se controlan durante todo el proceso de calentamiento y enfriamiento [31].

En la figura 9, se muestra la diferencia en el uso de la termografía pulsada y escalonada en una placa compuesta de carbono / epoxi. En las condiciones que están en el experimento, el contraste creado por el defecto ocurre justo después de alcanzar el régimen medio semi-infinito para el calentamiento por pulsos, pero mucho más tarde para el calentamiento por un escalón. En ambos no influye en la detección del defecto, pero hay una probabilidad que dificulte la caracterización cuantitativa (identificación de la profundidad) [32].

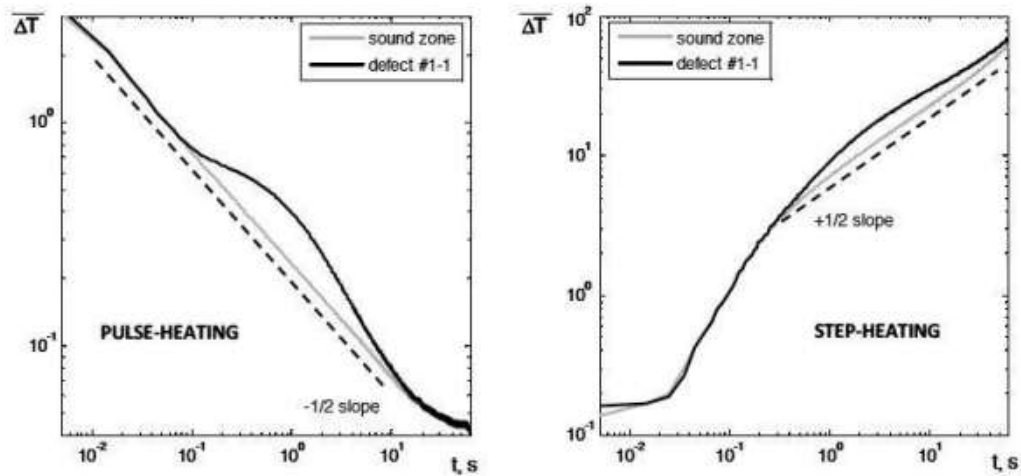


Figura 9: Evolución temporal del aumento de temperatura normalizado para calentamiento por pulsos (izquierda) y calentamiento escalonado (derecha) [32]

2.4.3 Termografía Lock-In

La termografía de Lock-in (también conocido de fase) se basa en el análisis de ondas térmicas mediante intensidad con una onda senoidal, a partir de la cual se describen los cambios de temperatura de una muestra, como respuesta a una excitación periódica, con ello se obtiene espectros de frecuencia bidimensionales (imágenes de amplitud y fase). El flujo de calor se codifica de tal manera que se puede decodificar de nuevo mediante el análisis de Fourier, mientras que se eliminan las perturbaciones no codificadas. Este método no solo muestra defectos de la muestra, sino también su estructura térmica dentro del rango de profundidad [30, 33].

Por ejemplo, una región actúa como una barrera térmica local dentro de la microestructura laminada que conduce a una atenuación adicional y un desplazamiento de fase de la señal de respuesta. La interferencia de las ondas entrantes y reflejadas genera un patrón de radiación oscilante armónica en la superficie del espécimen que es detectado por una cámara infrarroja durante un cierto período de tiempo. Luego, el dispositivo de medición electrónico está analizando una secuencia de imágenes infrarrojas mientras monitorea la evolución de la temperatura dependiente del tiempo para cada píxel de la imagen de la muestra. Con el análisis de Fourier es posible extraer la información de amplitud y fase de la onda térmica que responde (Figura 10) [34].

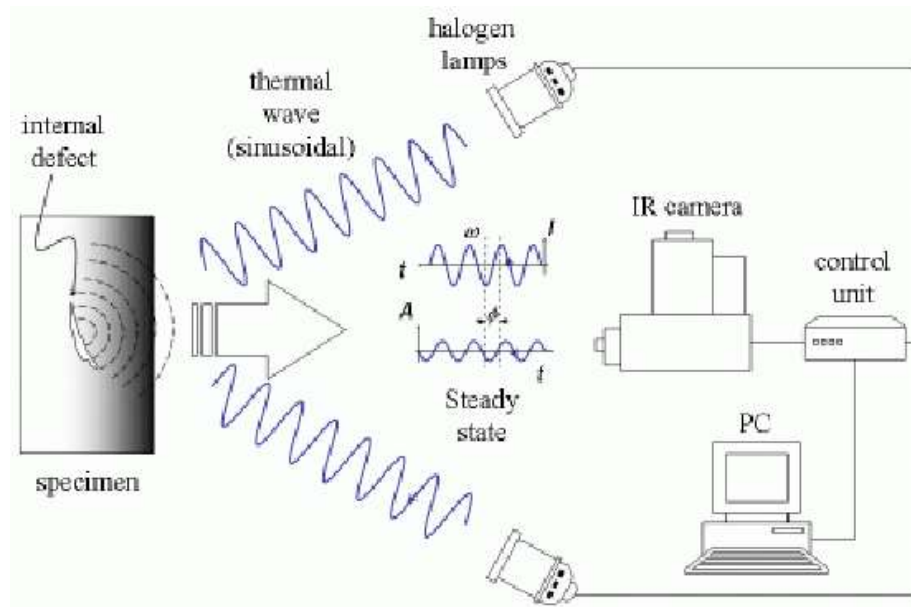


Figura 10: Principio de medición y configuración experimental de termografía de bloqueo con excitación óptica [34]

2.4.4 Vibrotermografía

La vibrotermografía, interroga la integridad interna y uniformidad de los materiales al observar el patrón de calor producido por la disipación de energía que ocurre cuando se aplica una excitación vibratoria específica a la pieza de prueba, por lo que estudia los patrones termográficos que se registran u observan en tiempo real durante dicha excitación [35].

El proceso de generación de señales en vibrotermografía está determinado casi en su totalidad por la interacción de la energía sónica inyectada con las propiedades mecánicas de la muestra. Las características de emisión térmica y de infrarrojos de la muestra juegan un papel relativamente pequeño [36].

En la figura 11, se presenta un ejemplo de la configuración de una ráfaga de vibrotermografía. El transductor de ultrasonido se aplica en la pieza de estudio, este al tener un defecto interno, manda una señal resultante que es capturado por la cámara IR, donde por último es procesado [16].

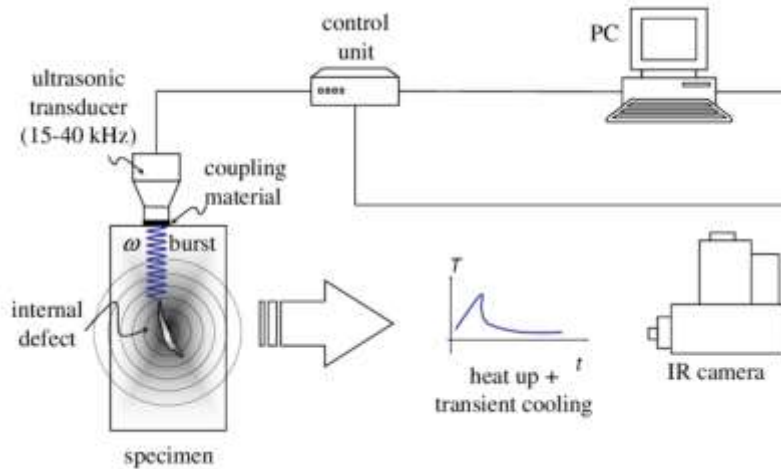


Figura 11: Configuración para vibrotermografía en ráfaga [16]

2.5 Sensores Infrarrojos

Los sensores IR, son dispositivos electrónicos que emiten y detectan señales infrarrojas que provienen en el entorno. Un sensor de infrarrojos puede medir el calor de un objeto y detectar el movimiento. Por lo general, en el espectro infrarrojo, todos los objetos irradian alguna forma de radiación térmica. Los sensores se clasifican en dos tipos las cuales son [37]:

- Sensores IR activos: Estos sensores incluye el transmisor y receptor. Los mejores ejemplos de este sensor de infrarrojos activo son la reflectancia y el sensor de haz de ruptura.
- Sensores IR pasivos: Estos sensores solo incluye un detector, y utilizan un objeto como un transmisor o una fuente de infrarrojos. Este objeto emite energía y detecta a través de receptores de infrarrojos. Después, se usa un procesador de señal para comprenderla y obtener la información requerida. Estos sensores se clasifican en dos tipos, sensor IR térmico y el sensor IR cuántico. El IR térmico no depende de la longitud de onda. La fuente de energía utilizada por estos sensores se calienta. Los detectores térmicos son lentos con su tiempo de respuesta y detección. El sensor de IR cuántico depende de la longitud de onda y estos sensores incluyen un alto tiempo de respuesta y detección. Estos sensores necesitan enfriamiento regular para mediciones específicas.

En el experimento se utilizarán cámaras termográficas que son sensores pasivos y se clasifica como térmico.

2.5.1 Cámaras Termográficas

La radiación infrarroja, no es detectable para el ojo humano, pero una cámara IR puede convertir en una imagen visual que muestre variaciones térmicas en un objeto o escena. Las imágenes capturadas, se realiza sin contacto con el objeto.

El detector de cámara IR es una matriz de plano focal (FPA) de píxeles de tamaño micrométrico hechos de varios materiales sensibles a las longitudes de onda IR. La resolución FPA puede variar desde aproximadamente 160×120 píxeles hasta 1024×1024 píxeles. Algunas cámaras de infrarrojos tienen un software integrado que permite al usuario enfocarse en áreas específicas del FPA y calcular la temperatura, en el cual permite realizar un análisis de temperatura con una precisión superior a $\pm 1^\circ \text{C}$.

Las tecnologías de detectores FPA se dividen en dos categorías [38]:

- Detectores térmicos: Tienen un costo bajo y una respuesta espectral IR amplia. Reaccionan a la energía radiante incidente, son lentos y poco sensibles.
- Detectores cuánticos: Se basa en el cambio de estado de los electrones en una estructura cristalina que reacciona a los fotones incidentes. Estos detectores son generalmente más rápidos y sensibles que los detectores térmicos. Sin embargo, requieren enfriamiento, a veces hasta temperaturas criogénicas.

A diferencia de una cámara convencional, la cámara IR detecta radiación electromagnética, en el cual la temperatura del objeto en estudio supera el 0 absoluto, esta captura convierte en una imagen, en cambio las cámaras convencionales, necesitan una fuente externa de luz para reflejar el objeto y tener visual del mismo. En la figura 12, se presenta un ejemplo de cámaras de vigilancia, en el cual una es la cámara convencional y la otra una cámara IR [39].

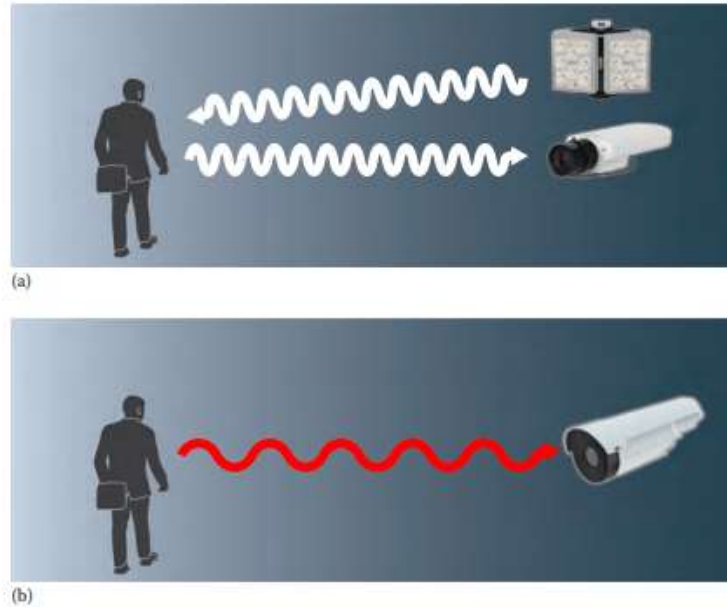


Figura 12: Diferencia entre la captura de imagen de una cámara convencional en el cual necesita una fuente externa (a) y la imagen de una cámara termográfica que captura las radiaciones electromagnéticas emitidos por la persona (b) [39]

Las imágenes adquiridas con cámaras de infrarrojos se convierten en imágenes visibles asignando un color a cada nivel de energía de infrarrojos. El resultado es una imagen en falso color llamada termograma [17].

Un ejemplo de termograma es la figura 13, en el cual la cámara termográfica captura la radiación infrarroja de un caballo, se observa que la cámara es calibrada obteniendo la temperatura de cada pixel de la imagen, donde un tono más azul son temperaturas frías, al contrario de los tonos amarillos y rojos.

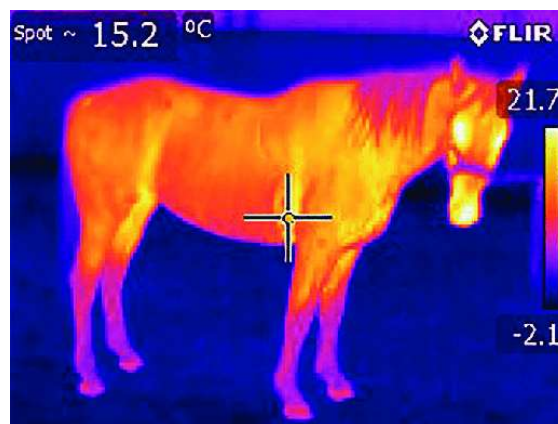


Figura 13: Termograma de un caballo [40]

2.6 Procesados para Secuencias Termográficas

La cámara IR al momento de capturar la radiación infrarroja emitido por el objeto en estudio, manda los valores de la radiación a un software instalado en un computador (el software es depende del fabricante), con ella se obtiene los termogramas de la pieza. Cada píxel de los termogramas, nos brinda alguna información de la pieza, proporcionando curvas de calentamiento y enfriamiento. Pero en ocasiones, los datos proporcionados no son suficientes para una buena interpretación del material en estudio. Por tanto, con los datos obtenidos se debe realizar un procesado del mismo, para tener una mejor visión de la pieza en estudio.

Los procesados se dividen en tres tipos:

- Usan mejoras del contraste térmico.
- Usan transformadas matemáticas
- Usan momentos estadísticos

En la siguiente lista se presenta los procesados que se aplica a las imágenes infrarrojas:

- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** Es una herramienta estadística utilizada para identificar patrones específicos en conjuntos de datos y analizarlos, que permite representar similitudes y diferencias de patrones específicos que ocurren en los datos, utilizando modos estadísticos adquiridos por descomposición de los datos en valores singulares (SVD en sus siglas en inglés). La idea principal del PCA en termografía, es transformar la información basada en el tiempo a un nuevo dominio donde la variación de temperatura detectada por la serie de termogramas podría estar asociada con defectos dentro de la estructura [41, 42].
- **Momentos Estadísticos:** Los datos obtenidos con termografía infrarroja son una secuencia de valores numéricos. Como consecuencia, estos valores numéricos podrían ser tratados por funciones estadísticas que describan ciertos comportamientos y para detectar cambios significativos entre unos valores y otros. Por este motivo, se utilizan distintos momentos estadísticos, que ofrecen distintos resultados. Skewness es el tercer momento estadístico estandarizado de una distribución. El término momento se utiliza para representar los valores esperados de las diferentes potencias de una variable aleatoria. Se utiliza para determinar el grado en que los datos se ajustan a un tipo de distribución determinado. Otro momento estadístico es Kurtosis, es el cuarto momento estadístico estandarizado de una distribución. Generalmente se define como una medida que refleja

el grado en que una distribución tiene una forma de pico. En particular, la Kurtosis proporciona información sobre la altura de la distribución en relación con el valor de la desviación estándar [19].

- **Tomografía Térmica Dinámica (DTT):** Es una herramienta que permite el análisis de la evolución de la temperatura en función del tiempo. Esta técnica se basa en las capas profundas del material que se caracterizan por retrasos más prolongados de la respuesta térmica. Esto es un reflejo del hecho de que, a diferencia de las partículas y los cuantos de radiación electromagnética, la energía térmica se propaga en los sólidos por difusión. DTT permite analizar los sólidos capa por capa, reducir el ruido de la superficie que empeora la eficacia del NDT, mejorar la detección del defecto y evalúa el defecto profundidad con una precisión razonable [43].
- **Termografía de Fase de Pulso (PPT):** Emplea la aplicación de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) a las imágenes térmicas obtenidas después del calentamiento instantáneo de la superficie frontal de una muestra. Los diagramas de fase calculados son excelentes para la visualización de defectos en una amplia gama de materiales. Esto se debe en parte a su baja sensibilidad al calentamiento desigual [44].
- **Reconstrucción de Señales Termográficas (TSR):** Los valores de temperatura dependientes del tiempo se representan en una escala logarítmica doble. Luego, cada secuencia logarítmica de tiempo-temperatura se aproxima mediante un polinomio. TSR es uno de los algoritmos más utilizados para estimar la difusividad térmica efectiva de muestras [45].

De los procesados mencionados, se aplicará uno solo a los resultados que entregará la cámara termográfica. Se selecciona el método TSR porque es el más utilizado para la estimación de la difusividad, parámetro importante al momento de estimar el espesor del caucho, además en la actualidad se sigue desarrollando avances del logaritmo TSR para NDT [45, 46, 47]. El procesado seleccionado se detalla en el siguiente apartado.

2.6.1 Reconstrucción de Señales Termográficas (TSR)

La técnica de reconstrucción de señales termográficas (en sus siglas en inglés TSR) es lo más novedoso en termografía al nivel de las técnicas de evaluación no destructivas (en sus siglas en inglés NDE). La técnica TSR, está basada en la descomposición de termogramas sobre una base de polinomios logarítmicos y el uso de las derivadas logarítmicas para mejorar la detección de defectos en estructuras.

En los siguientes puntos, se presenta el método TSR:

- El ajuste del termograma log-log plot experimental por un polinomio logarítmico de grado n:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 [\ln(t)]^2 + \dots + a_n [\ln(t)]^n \quad (8)$$

Con ΔT la temperatura aumenta en función del tiempo t (termograma) para cada píxel (i, j) . Este ajuste reemplaza la secuencia completa de imágenes de aumento de temperatura $\Delta T(i, j, t)$ por la serie de $(n + 1)$ imágenes de los coeficientes polinomiales: $a_0(i, j), \dots, a_n(i, j)$, de las cuales se puede reconstruir una secuencia termográfica completa.

- El cálculo de la 1ª y 2ª derivada logarítmica de los termogramas, siendo la derivación realizada directamente sobre el polinomio, con un incremento limitado del ruido temporal.

Las secuencias de imágenes de los derivados pueden observarse cualitativamente para detectar los defectos (Figura 14), o usarse cuantitativamente para evaluar la profundidad de un defecto a partir de tiempos característicos. Las imágenes resultantes tienen una mejor relación señal-ruido (SNR) y nitidez que las imágenes termográficas crudas, pero es necesario seleccionar varias imágenes, cada una adaptada a un rango de profundidad específico [46, 47].

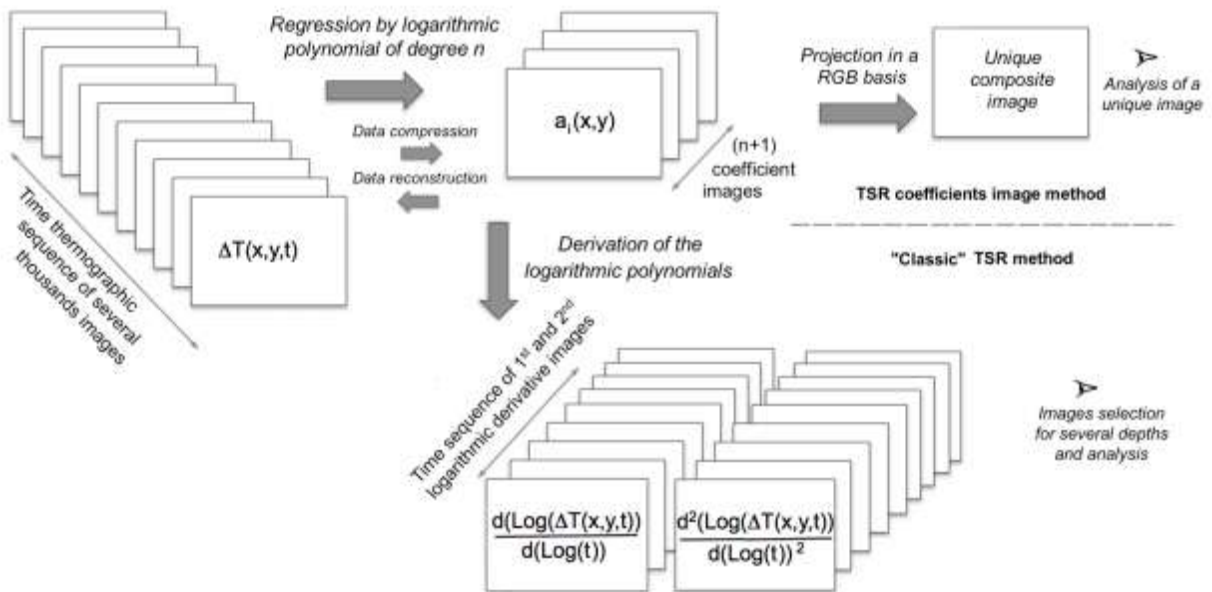


Figura 14: Detección de defectos por método TSR [46, 47]

La composición del material, los defectos internos o las diferentes capas tienen respuestas diferentes al utilizar el método TSR. Con la pieza en estudio, se aplicará el proceso al material de

acero y a la estructura sándwich, para comparar los resultados del acero y como esta cambia su comportamiento cuando se incluye una capa de caucho.

Con el método TSR se obtiene como resultado un polinomio de grado n , con ella se obtiene una recta que es la respuesta del material. El material al tener un defecto o alguna capa adicional, generalmente, se visualiza una o varias discontinuidades a lo largo de la recta. Al existir pendientes, se identifica los tiempos críticos en el cual indican el cambio de pendiente. Al aplicar la primera derivada al polinomio resultante se obtiene máximos y mínimos, mediante las siguientes condiciones:

- Si la función derivada cambia de positiva a negativa en un tiempo crítico, entonces la función tiene un máximo relativo.
- Si la función derivada cambia de negativa a positiva en un tiempo crítico, entonces la función tiene un mínimo relativo.

Los máximos y mínimos relativos indican la respuesta del material en el proceso de calentamiento enfriamiento, además de los defectos o las capas adicionales que contiene la pieza en estudio. La aplicación de la segunda derivada al polinomio resultante se obtiene los signos positivo y negativo, mediante las siguientes condiciones:

- Si la segunda derivada de la función tiene como resultado un número negativo, entonces la función tiene un máximo relativo.
- Si la segunda derivada de la función tiene como resultado un número positivo, entonces la función tiene un mínimo relativo.

Con la anterior definición, los máximos y mínimos relativos indican la respuesta del material y las capas adicionales o defectos.

3 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

El setup propuesto, se presenta en el esquema de la figura 15, donde la pieza en estudio será excitado por un láser, el calor que emita será capturado por una cámara termográfica, los datos que se recoja será procesado en un software propio de la cámara para observar las curvas de calor, por último, se procesará los datos obtenidos mediante Matlab aplicando un algoritmo que realice el procesamiento TSR del punto 2.6.1.

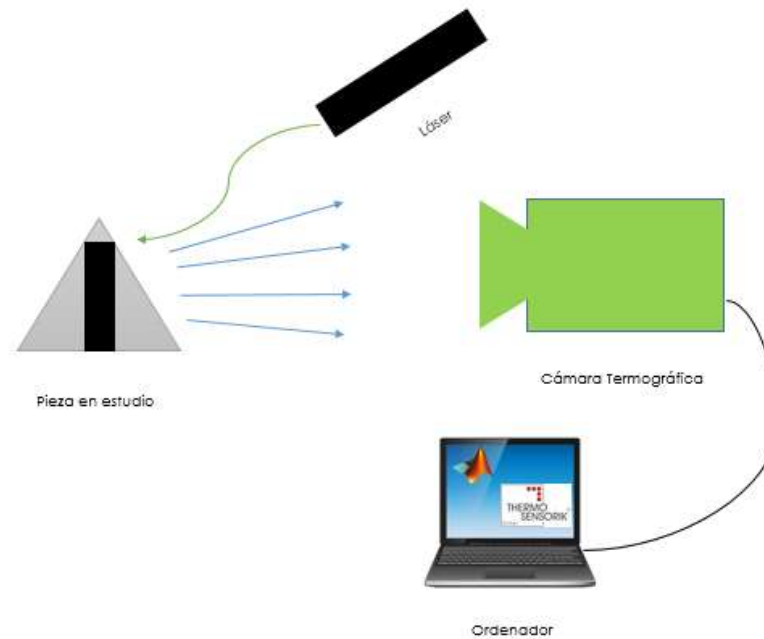


Figura 15: Esquema del setup propuesta para las medidas

La pieza en estudio, es parte del tambor de la suspensión neumática de un camión, comprende la estructura tipo sándwich (acero-caucho-acero). En la figura 16, en la parte A, se presenta la parte frontal de la pieza, la excitación se realizará en esa posición porque la posición y el objeto representan al tambor completo y cerrado. En la parte B de la figura 16, se evidencia la estructura tipo sándwich. Otro punto a considerar es la cinta negra adherida a la pieza, su función es la de absorber calor lo que permitirá alcanzar mayores profundidades en el objeto en estudio.

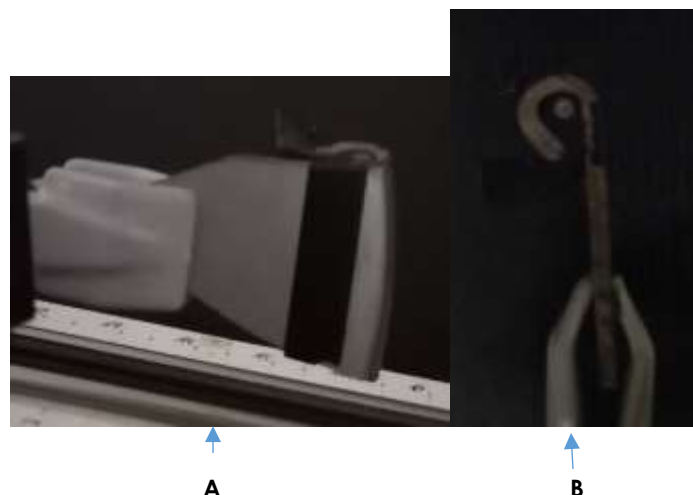


Figura 16: Pieza en estudio, perteneciente al tambor de la suspensión neumática. La parte A, es la frontal donde se excita con el láser en la parte negra que contribuirá a la absorción del calor. La parte B, se observa la parte interior de la pieza en la suspensión neumática, en el cual se evidencia la estructura tipo sándwich (acero – caucho – acero)

En los siguientes apartados se describe las fuentes de excitación, los sensores infrarrojos y el software para implementar en la medición del caucho en la estructura sándwich.

3.1 Fuentes de Excitación

La energía necesaria para crear flujo de calor, se proporciona mediante fuentes externas las cuales son: radiación, convección y conducción térmica. En la tabla 1 se presenta la variedad de opciones clasificadas por las tres fuentes previamente mencionadas.

Tabla 1: Fuentes Externas [20]

| Fuente Externa | Elemento |
|--------------------|------------------------------------|
| Radiación | Fotocélula |
| | Emisores de Infrarrojos |
| | Lámparas Halógenas |
| | Láseres |
| | Microondas |
| | Sol |
| Convección | Sopladores de Aire Frío o Caliente |
| Conducción térmica | Secadores |
| | Placas Calefactoras |
| | Agua Fría o Caliente |

Estos métodos están limitados por una temperatura superficial máxima permisible de la muestra de prueba y la inercia de la fuente de energía (duración mínima del pulso o frecuencia máxima de modulación). También hay que tener en cuenta que la probeta debe poder absorber la

energía. Esto significa que debe poseer un alto coeficiente de absorción (o alta transferencia de calor) [20].

La excitación se producirse de diferentes formas. Las más utilizadas son [20]:

- Forma puntual: El calentamiento se realiza a escala local con flujo de calor tanto hacia la profundidad como hacia los lados. Este flujo de calor bidimensional y simétrico también permite detectar grietas perpendiculares a la superficie.
- Lineal: La calefacción se utiliza principalmente en termografía en línea. La medición de la temperatura de la superficie se realiza directamente detrás de la línea.
- Plano: Toda la superficie de la muestra de ensayo se calienta y, por lo tanto, se registra al mismo tiempo. Esto da como resultado un flujo de calor unidimensional en la profundidad (de la muestra).

En el experimento, se utilizará como fuente de excitación el láser, se realizará pruebas con las formas puntual y lineal por lo que hacemos más hincapié en ellas.

3.1.1 Excitación Láser Puntual

Las medidas por láser de forma puntual se basan en el análisis de los cambios en la distribución de la temperatura de la superficie en la vecindad cercana del punto láser excitante. En la figura 15, muestra el principio básico de la secuencia de medición de la termografía puntual con láser. Un pulso corto de luz láser calienta secuencialmente la superficie de la muestra en varios puntos, p_1 a p_n , como se muestra en la figura 17. La cámara termográfica está sincronizada con la fuente láser para registrar una secuencia de imágenes térmicas que comprenden las fases de calentamiento y enfriamiento del material en las proximidades de cada punto. Los materiales homogéneos térmicamente isotrópicos, su distribución de temperatura alrededor del punto de excitación son continuas y simétricas. La falta de simetría y la discontinuidad del perfil de temperatura puede ser el resultado de la presencia de defectos como grietas o huecos. Por lo tanto, el análisis del perfil de temperatura y el historial de tiempo en las proximidades del punto del láser de excitación se utiliza para identificar el daño [48].



Figura 17: Secuencia de medición en termografía de punto láser [44]

3.1.2 Excitación Láser Lineal

La excitación láser lineal, es ajustable y más concentrada que una excitación en área, aunque menos que la forma puntual. Por tanto, tiene una mayor sensibilidad. Además, dado que el láser lineal apunta a diferentes áreas en diferentes momentos de tiempo, se evita el efecto de resplandor. Por ejemplo, basados en el artículo de OSA titulado "Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings", cuando una línea de flujo de calor se transfiere desde la superficie al fondo de un sistema TBC (siglas en inglés de Recubrimientos de barrera térmica), la distribución de la temperatura de la superficie en los defectos TBC será anormal debido al hecho de que los defectos cambian los parámetros térmicos de las muestras [49].

3.1.3 Fuente de Excitación a Implementar

Para las medidas, se utilizarán ambas excitaciones (puntual y lineal), seleccionando el láser verde como la fuente de excitación, donde los parámetros son los siguientes:

- Longitud de onda de 535 nm
- Una potencia máxima de 500 mW

Para el funcionamiento del láser, la fuente de alimentación a utilizar es PSU-H-LED (figura 18), que tiene las siguientes características [50]:

- Tiene un botón de encendido y apagado, pero además de una llave de funcionamiento para activar el láser.
- Incluye una perilla para aumentar o disminuir la potencia de salida del láser.
- Interfaz de señal de control externa TTL o analógica.



Figura 18: Esquema del setup propuesta para las medidas [50]

El método termográfico a utilizar es la escalonada, porque permite pruebas a grandes profundidades a la pieza de estudio y se tiene mejor visual al comportamiento de las curvas de calentamiento y enfriamiento. Para lograr la termografía escalonada, se utiliza la opción de disparo del láser, en la cual será controlado por medio de un generador de funciones.

3.2 Cámara Termográfica Utilizada

Se utilizará la cámara termográfica de la empresa "Thermosensorik GmbH" (figura 19), el modelo es CMT 128 SM, en la cual su máxima frecuencia de imagen completa es de 854 Hz, en combinación con una excelente sensibilidad térmica menor a 20 mK. En la tabla 3 se presentan las demás características de la cámara [51].



Figura 19: Cámara termográfica "Thermosensorik GmbH" [51]

Tabla 3: Datos técnicos de la cámara termográfica [51]

| | |
|-------------------|-----------------------|
| Tipo de Cámara | CMT 128 SM |
| Formato de imagen | 128 x 128 píxel |
| Tamaño del píxel | 20 μm |
| Rango espectral | 1.5 – 5 μm |

| | |
|--|--|
| Número F | F/1.5 |
| Detector de temperatura | 80 K |
| Velocidad de fotogramas | Máximo 854 Hz |
| Imágenes por segundo | 412 |
| Tiempo de Integración | 0.02 ms.....4ms (512 pasos, 8μs de incremento) |
| Diferencia de temperatura equivalente al ruido | 20mK |

Las imágenes captadas por la cámara, manda a la unidad centrar "TS 50" (figura 20), en el cual se destacan las siguientes características mostrados en la tabla 4 [52].



Figura 20: Unidad central "TS 50" [52]

Tabla 4: Datos técnicos de la unidad central [52]

| | |
|--------------------------|---------------------------|
| Modelo de unidad central | TS 50 |
| Placa Base | Intel D865 PERLL |
| Procesador | Intel Pentium 4, 2.8 GHz |
| RAM | 2 GB |
| Adaptador de gráficos | Matrox Parhelia |
| Capturador de fotogramas | MatrixVision PCImage-SDIG |
| Sistema Operativo | Windows XP |

Para visualizar los termogramas capturados, se debe instalar el software "MPS 5", en la cual contribuirá en la visualización de las imágenes de calor de la pieza en estudio, la generación de las curvas de calor, entre otras herramientas [53].

Por último, las curvas de calor obtenidos por el software "MPS 5" serán procesados con los métodos planteados en el punto 2.7. El software responsable del procesamiento será Matlab, porque la plataforma ofrece facilidades para la implementación de un mayor número de algoritmos para ejecutar algún método que desee el usuario.

4 MEDIDAS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal del presente trabajo es de determinar el espesor del caucho en una estructura tipo sándwich de un tambor de la suspensión neumática utilizando termografía infrarroja activa. Para lograrlo, se utilizará un láser con una potencia de 0.5 mW a una longitud de onda de 535 nm, en el cual excitará la pieza en estudio, este transmitirá calor el cual es capturado por una cámara termográfica, con los termogramas resultantes se extrae las curvas de calentamiento e enfriamiento, donde se aplica un procesamiento para cumplir el objetivo mencionado.

En este capítulo se muestra las medidas a implementar en la pieza de estudio, los resultados obtenidos con la que se alcanza los objetivos mencionados y una discusión de los resultados, analizando del porque los valores obtenidos y los inconvenientes que pudo afectar en el proceso.

4.1 Medidas

Para comenzar la captura de termogramas mediante la excitación láser a la pieza de estudio, se debe armar el esquema presentado en la figura 13, que contribuirá a múltiples medidas para la obtención de los resultados esperados. En la figura 21, se muestra el esquema armado con los equipos presentados en el apartado 3. Se observa, que el láser está apuntando a la parte frontal de la pieza (parte A de la figura 14), además que la cámara termográfica enfoca la parte frontal del objeto en estudio, por tanto esta posición de los equipos contribuirá a la obtención de los termogramas de la pieza incluyendo una mejor lectura de los cambios de temperatura. En el esquema armado (figura 21), se encuentran dos elementos que no incluyen en el esquema de la figura 13, esos son el soplador y el generados de funciones. La función del soplador, contribuye al calentamiento de la pieza, con el objetivo de realizar un mejor enfoque a la estructura. La función del generador de funciones, es generar pulsos para el control de encendido y apagado del láser, esto contribuye a la generación de las curvas de calentamiento y enfriamiento. Por último, la cámara está conectada a la unidad central y esta a su vez a un ordenador, con el fin de visualizar y analizar los termogramas capturados.

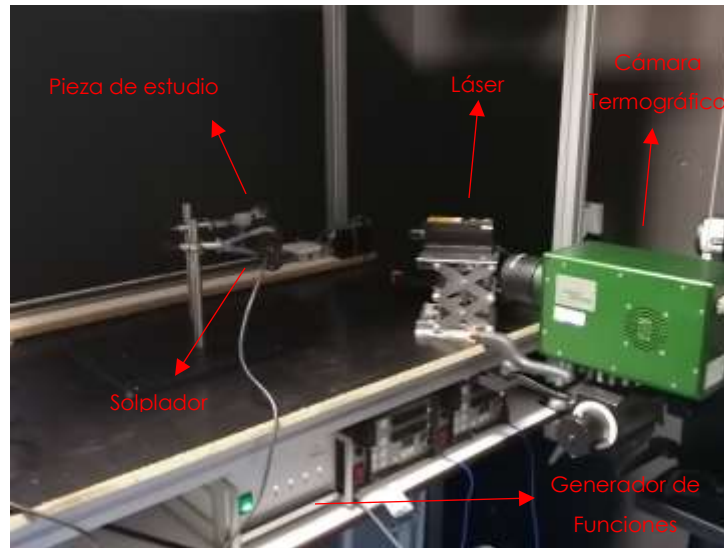


Figura 21: Esquema armado para la aplicación de termografía activa infrarroja a la pieza de estructura tipo sándwich perteneciente a un tambor de la suspensión neumática

Se mencionó anteriormente, que se utilizará la excitación láser puntual y lineal para el estudio de la pieza. El método lineal tiene una gran ventaja respecto a la puntual, el cual consiste en el área de excitación porque con lineal se tiene una gran extensión que abarca a la totalidad a la región de interés a medir por tanto se requiere menos medidas; en cambio con el método puntual, el área es pequeña y se necesitaría múltiples medidas para abarcar el estudio de la región de interés del objeto en estudio.

En la figura 22, se observa una prueba de excitación de laser de forma lineal, en el cual es capturado por la cámara termográfica y extrayendo los datos al software de Matlab se visualiza el termograma de un tamaño de 120 x 120 píxeles. Se verifica que la línea (marcado en círculo amarillo), abarca una gran área en la zona de interés de estudio, pero se presenta un inconveniente, la temperatura no está distribuida uniformemente ya que si se observa con detalle la barra de colores, se tiene un punto con una mayor temperatura y a lo largo de recta las temperaturas son muy bajas. La distribución no uniforme de la potencia es un problema para la medición del espesor del caucho, porque con las bajas temperaturas, el calor inducido no llega hasta el caucho por lo que solo se tendrá la respuesta del acero. Solo se tendrá una respuesta esperada en el punto caliente mostrada en la figura 22. Además, si se implementa este método solo se tendrá las respuestas en los bordes de la región de interés por lo que no se abarcaría toda el área de trabajo. Por tanto, la forma de excitación a utilizar es el puntual abarcando la mayor parte del área de trabajo de forma manual.

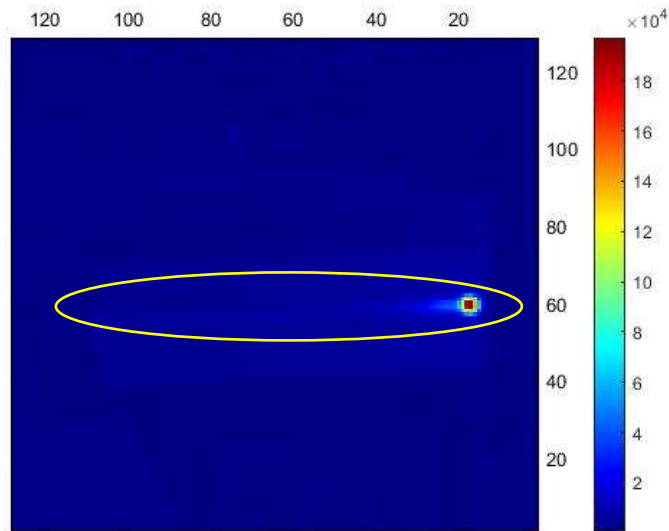


Figura 22: Termograma visualizando la excitación láser lineal

En la figura 23, se observa los puntos en el cual se obtendrá la respuesta de la pieza utilizando la excitación láser puntual. Con los puntos indicados, se tiene la capacidad de abarcar una gran parte del objeto en estudio. Lo que destaca la posición de los puntos, es la posibilidad de recibir distintas respuestas del material. En los puntos J2, J4 y J8 se encuentran en el borde donde finaliza la estructura sándwich (acero-caucho-acero), en el cual los materiales se separan por el aire, por lo que se involucra en la respuesta de la pieza. En los puntos J1, J5 y J6, se observa que no es la estructura sándwich previamente descrito, se incluye una barra de metal en el centro de la pieza por lo que la estructura sándwich tendrá cinco capas y esta será formado por acero-caucho-acero-caucho-acero. Los puntos J0, J3 y J7, conforma la estructura previamente descrita.

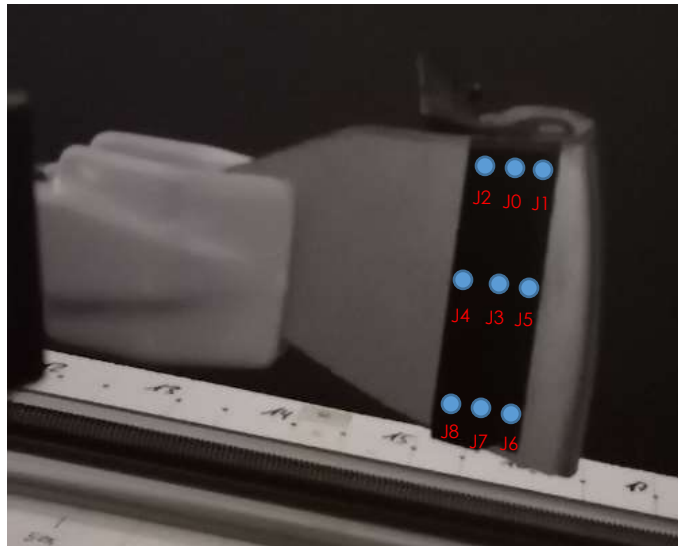


Figura 23: Posición de los puntos a la pieza de prueba, cada punto será apuntado por el láser para su debida excitación.

En el presente trabajo se describieron los métodos termográficos para excitación, las cuales son: pulsado, escalonado, lock-in y vibrotermografía. Los métodos a tomar en cuenta son el pulsado y el escalonado, porque su comportamiento permite extraer las curvas de calentamiento y enfriamiento. La diferencia entre los dos métodos seleccionados, es el tiempo que dura el pulso, donde el escalonado tiene mayor duración, por lo que es ideal para obtener la respuesta deseada del material. La razón para descartar el pulsado es la poca duración del pulso, ya que generalmente son tiempos muy cortos. La potencia máxima del láser alcanza a los 0.5 mW, este valor no es suficiente para atravesar totalmente el metal, por lo que no será posible que el calor se expanda al caucho, esto es debido a la conductividad del metal, en el cual es muy alta en todas las direcciones, esto no permite difundir el calor transversalmente hasta llegar al caucho.

Para la captura de los termogramas, se debe enfocar la pieza y en la interfaz del software "MPS 5", se debe visualizar de forma nítida, esto quiere decir que los bordes deben diferenciar del fondo de la imagen y ver de forma detallada que porción de la imagen abarca la pieza en estudio. Además, el software permite modificar de cuantas imágenes por segundo se quiere capturar con la cámara. Se utilizará el máximo valor (412 imágenes/segundo según la tabla 3), para analizar a detalle el comportamiento del material al calentarse y enfriarse.

4.2 Resultados

Una vez concluido el armado del esquema con las configuraciones y características mencionadas, se procede a la captura de los termogramas mediante la excitación láser puntual a la pieza de estudio. Primeramente, se debe configurar los parámetros iniciales para el periodo de pulso, en el cual debe evidenciar el comportamiento del material en el proceso de calentamiento y enfriamiento. Los parámetros configurados que se verifica el comportamiento esperado del material se observa en la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros iniciales para la generación de pulso para la excitación láser puntual de la pieza

| Parámetros | Valor |
|--------------------|----------|
| Frecuencia | 63 mHz |
| Periodo | 15.873 s |
| Ancho de pulso | 7.873 s |
| Potencia del láser | 0.5 mW |

Con los parámetros ya configurados, se realiza la cantidad de medidas necesarias para obtener los termogramas. En la figura 24, se presenta un ejemplo de termograma del punto J3 (ver figura 23) de un tamaño de 128 x 128 píxeles, en el cual se observa la excitación láser puntual en la pieza. Al momento de analizar las curvas de calor de la pieza, se extrae solo los datos del punto caliente, porque el resto de la imagen no contribuye al objetivo general.

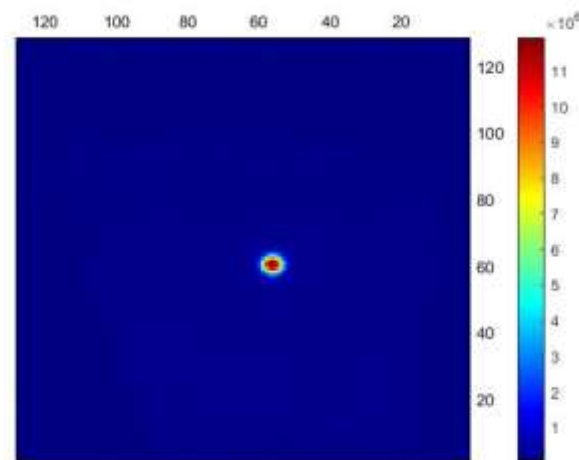


Figura 24: Excitación láser puntual en el punto J3

Cada punto seleccionado de la figura 23, contiene 25010 termogramas (a excepción de los puntos J0 y J1) las cuales las 10 primeras son imágenes frías, importantes para restar efectos térmicos espurios o no deseados que se encuentra alrededor de la pieza a medir incrementando

el ruido de medida. Se extrae los datos de cada punto caliente, las gráficas resultantes son pulsos, donde la subida se representa el calentamiento y las bajadas el enfriamiento. Los pulsos resultantes presentan con demasiado ruido el cual es difícil de interpretar y puede brindar resultados erróneos. Para suprimir el ruido, se aplica un filtro de medianas, el cual es una técnica de filtrado digital no lineal, donde la idea principal es reemplazar cada entrada con la mediana de las entradas vecinas. Aplicando el filtro se generan las figuras 25, 26 y 27, donde se observa los pulsos filtrados resultantes.

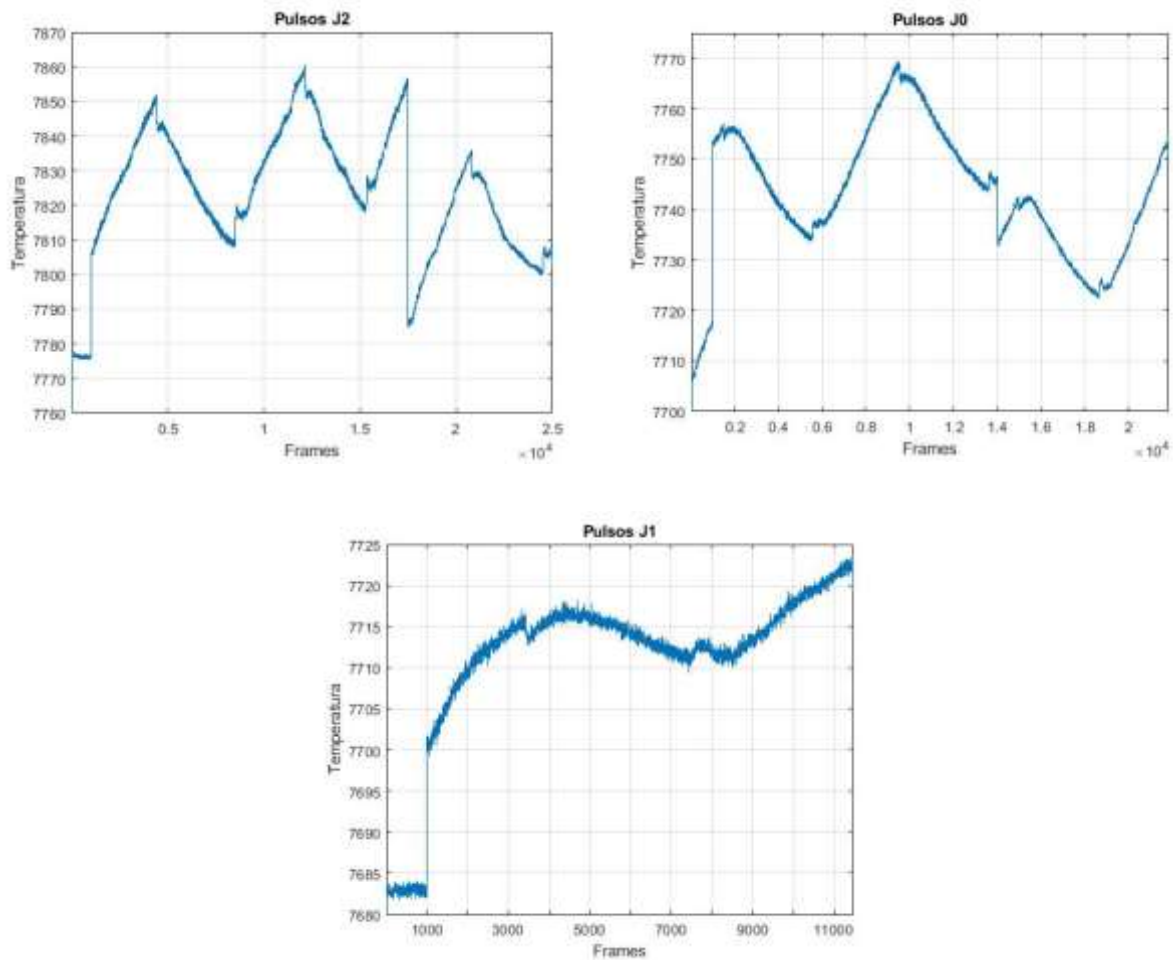


Figura 25: Pulsos resultantes filtrados por un filtro de la mediana a los puntos J0, J1 y J2 proveniente de la excitación láser de forma puntual

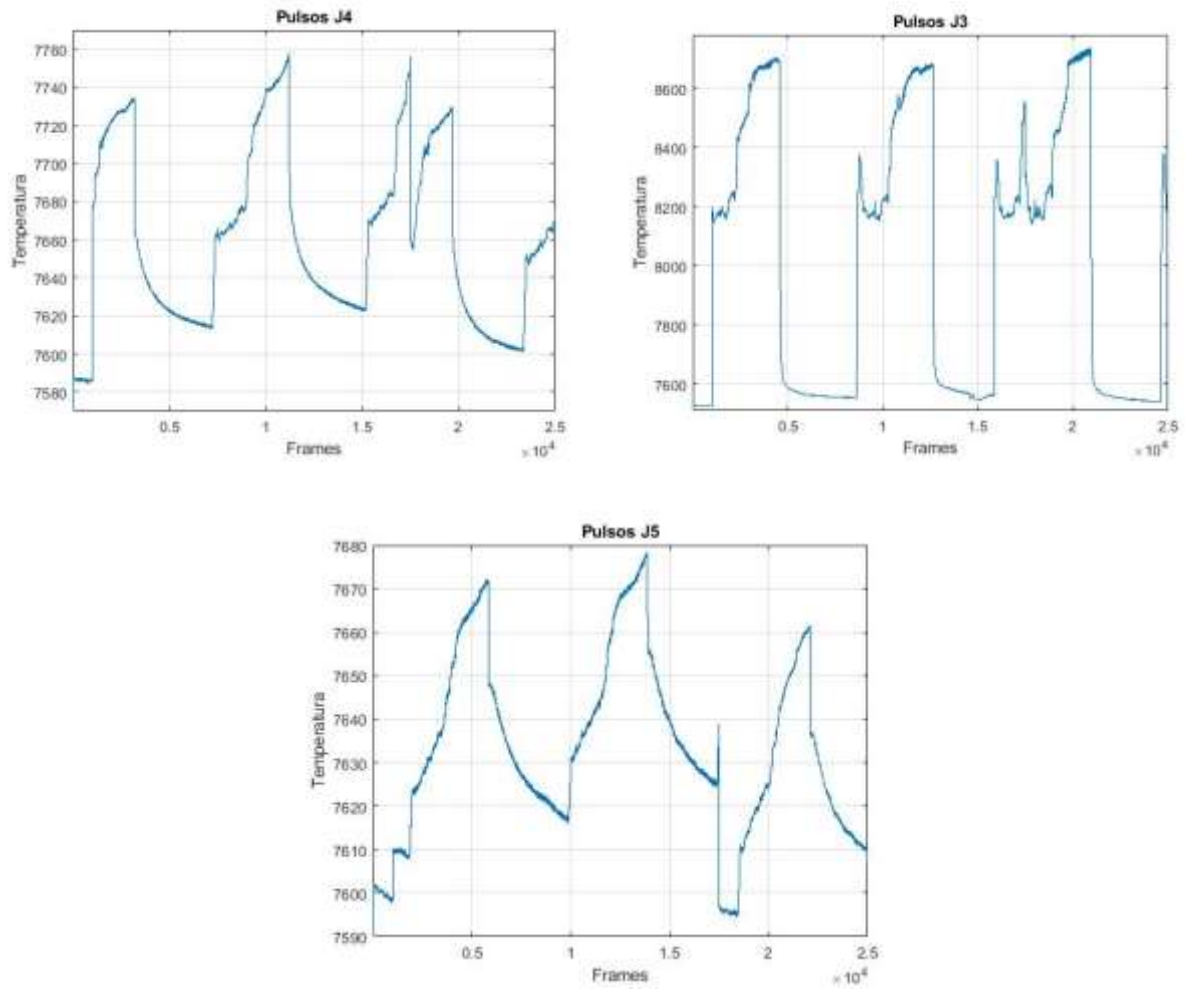
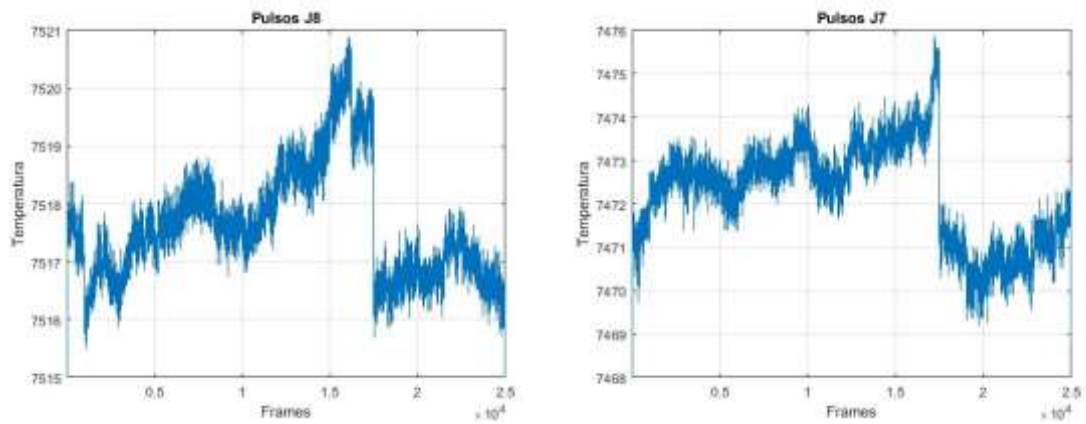


Figura 26: Pulsos resultantes filtrados por un filtro de la mediana a los puntos J3, J4 y J5 proveniente de la excitación láser de forma puntual



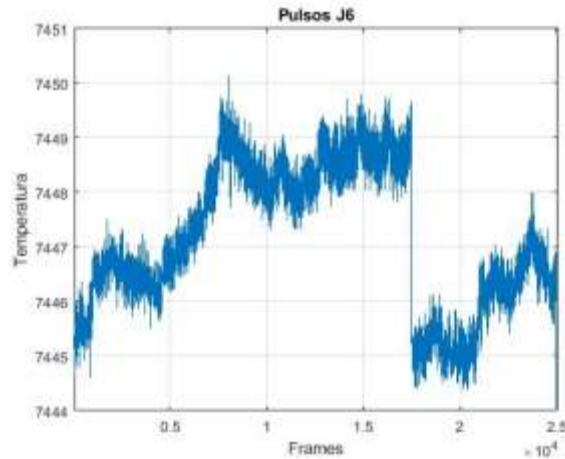


Figura 27: Pulsos resultantes filtrados por un filtro de la mediana a los puntos J6, J7 y J8 proveniente de la excitación láser de forma puntual

Como se mencionó anteriormente, cada uno de los puntos incluyen 25000 termogramas y tomando en cuenta los parámetros configurados de la tabla 5 y la velocidad de captura de imágenes de la cámara (412 imágenes/segundo), se debería visualizar de forma completa tres pulsos, en el cual los puntos J2, J3, J4 y J5 se observa la cantidad mencionada, pero los puntos J6, J7 y J8 no se identifica ningún pulso, esto puede deberse al ruido de la cámara o un factor externo del ambiente que alteró los resultados, por tanto para un posterior análisis se realizará el procedimiento solo a la caída repentina porque esta parte de la gráfica, tiene ruido casi nulo y es el único parámetro que puede indicar el comportamiento de los puntos. Para la cantidad de termogramas del punto J0 (21834 imágenes) y del punto J1 (11460), se debe visualizar tres pulsos y un pulso de forma completa respectivamente, en el caso de J0 se verifica los 3 pulsos pero para el punto J1 se observa una recta de forma ascendente, en el cual no se identifica el enfriamiento. Para el punto J1, se muestra que el calentamiento llega un tiempo crítico en el cual comienza a tener una recta descendente, esta parte de la gráfica se extraerá para realizar el análisis posterior.

Los pulsos resultantes, no son consistentes, quiere decir que no tienen la misma forma los pulsos en un mismo punto, por ejemplo en el punto J4, el último pulso, a la mitad se tiene una baja y subida repentina, el cual es diferente a los otros pulsos esto puede ser debido a una descalibración del generador de funciones o al ruido de la propia cámara.

Una vez visualizado los puntos de la pieza, se aplicara el procesado TSR para encontrar una respuesta del material tanto en calentamiento como en enfriamiento. Se aplicará el procesado a un pulso promedio por cada punto. Para aplicar TSR los termogramas deben ser ajustados en

el tiempo, por lo que se debe convertir de imágenes a tiempo y esto se logra dividiendo entre 412 imágenes/ segundo (máxima velocidad de la cámara para la obtención de los termogramas), con ellos se comienza aplicar el procesado.

4.2.1 TSR para un Pulso Promedio

Cada pulso promedio se divide en una parte de calentamiento y la otra parte de enfriamiento. Por separado, se aplica la ecuación 8 del procesado TSR. Lo primero que se realizará es verificar que grado de polinomio es ideal para el análisis de la respuesta que entregue el procesado. Según [46, 47] para el clásico método de TSR, el grado de polinomio ideal es 11 mientras para una imagen RGB es de grado 7. En las figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35; se muestra los diferentes grados de polinomios aplicados las curvas de calentamiento y enfriamiento a los puntos seleccionados. Además, se incluye las medidas del acero, que contribuirán a la comparación del comportamiento de cada punto de la pieza en estudio.

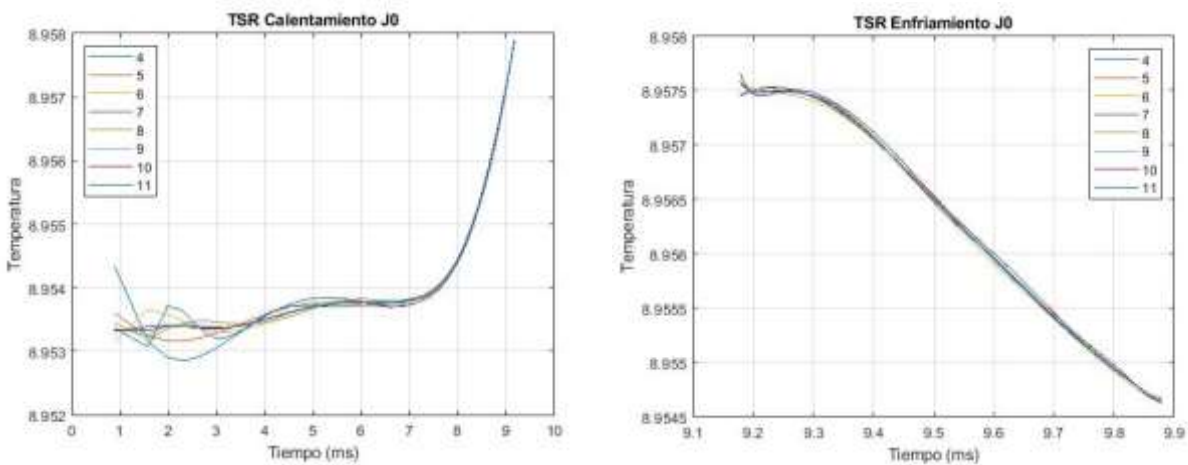


Figura 28: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J0

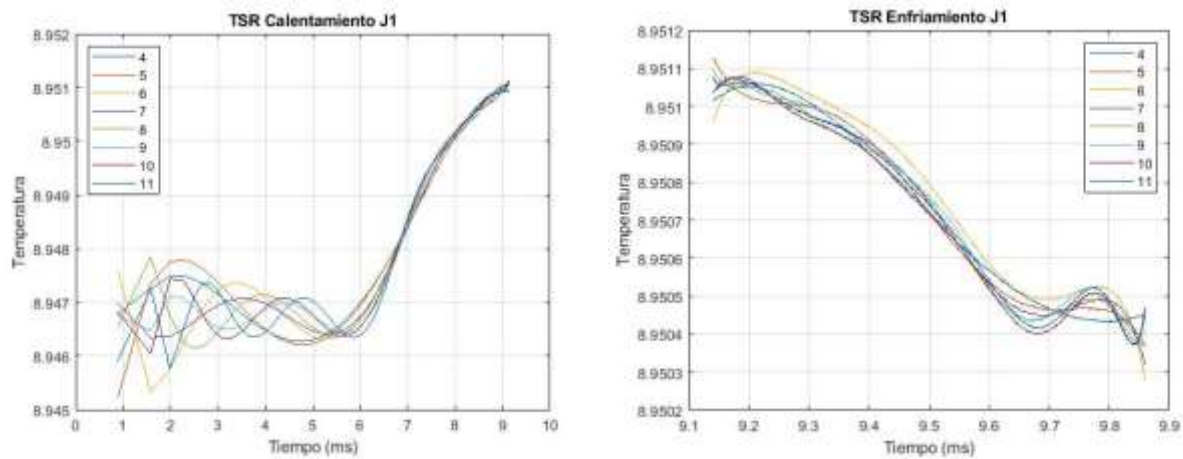


Figura 29: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J1

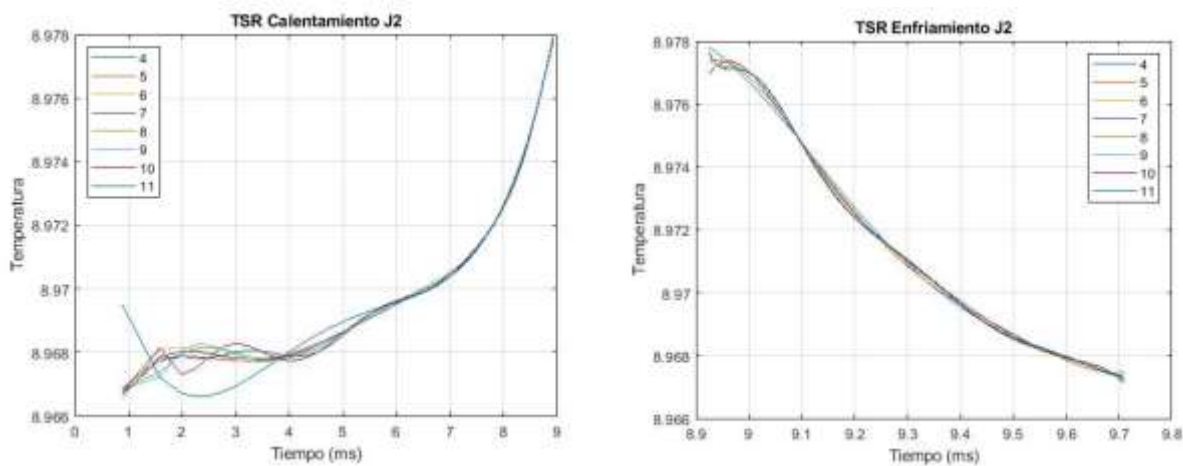


Figura 30: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J2

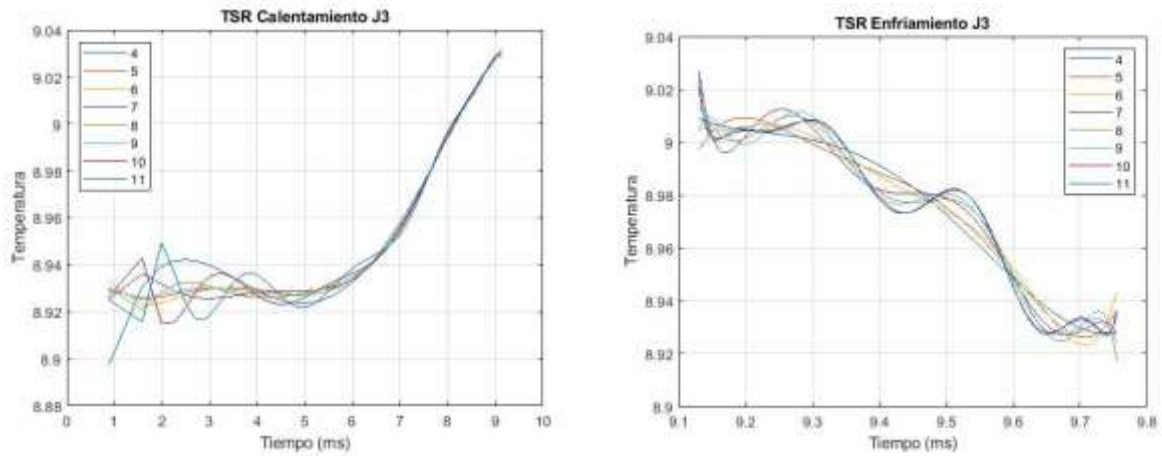


Figura 31: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J3

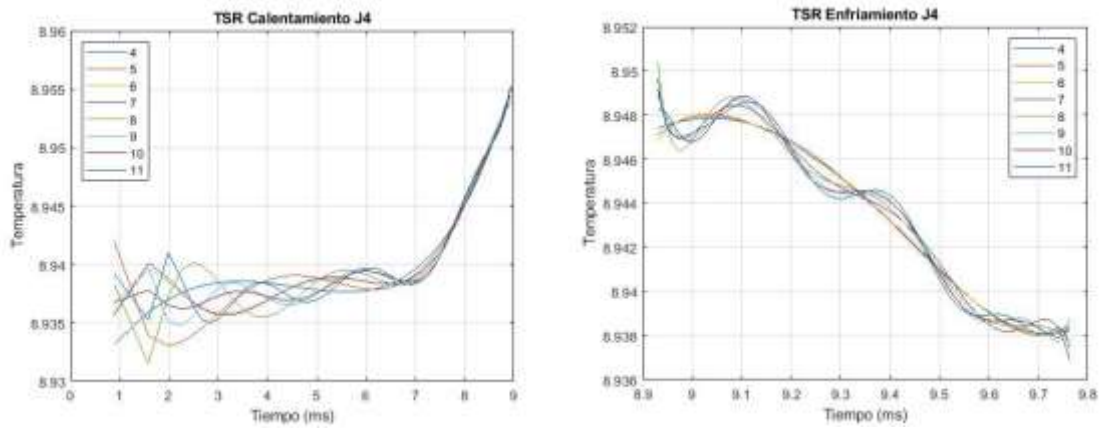


Figura 32: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J4

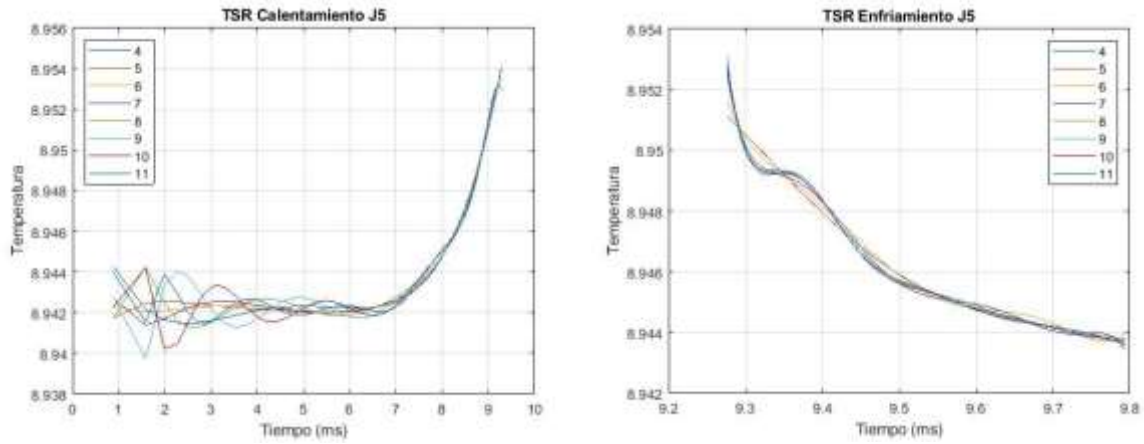


Figura 33: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para el punto J5

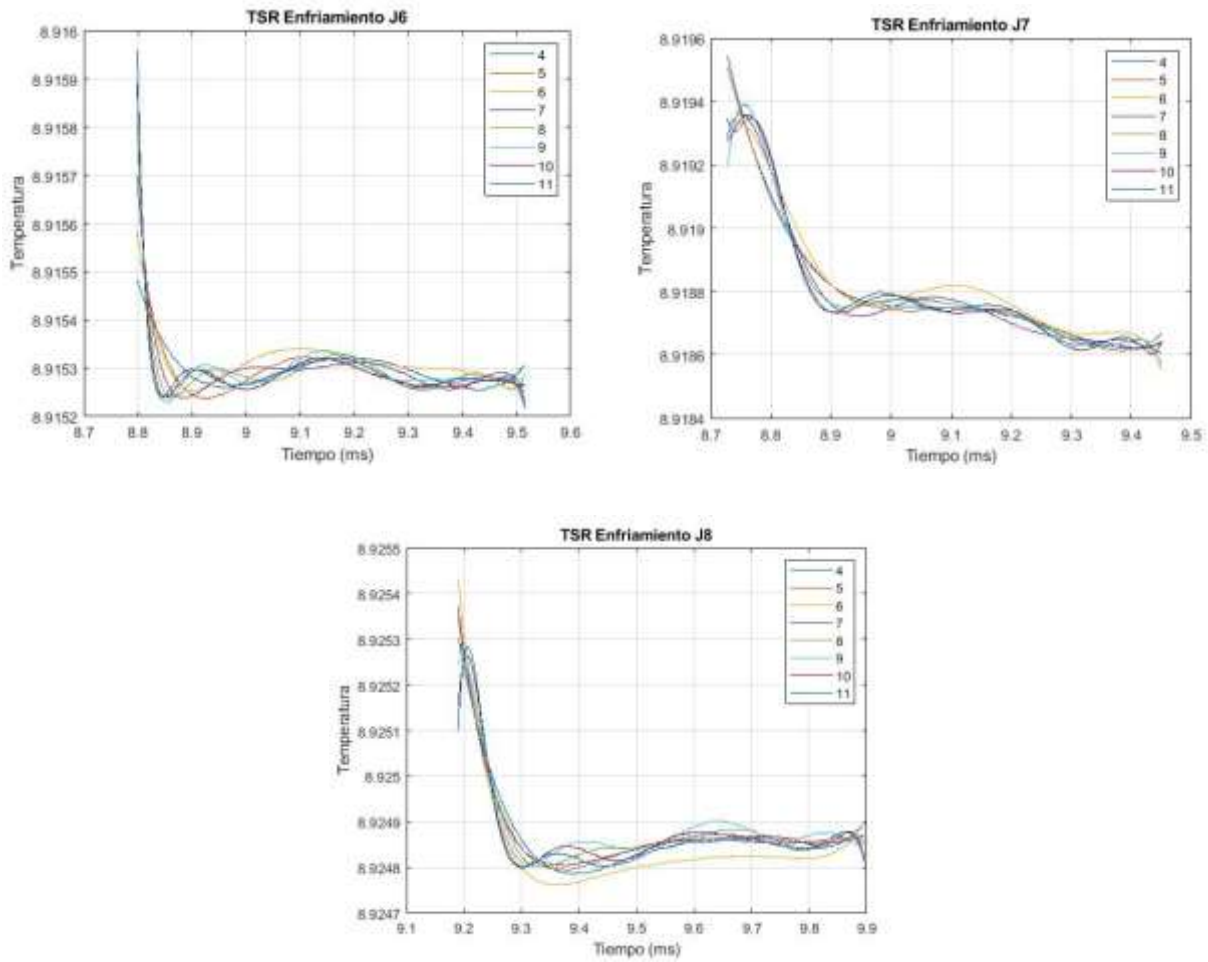


Figura 34: Procesado TSR a las curvas de enfriamiento con diferentes grados polinómicos para los puntos J6, J7 y J8

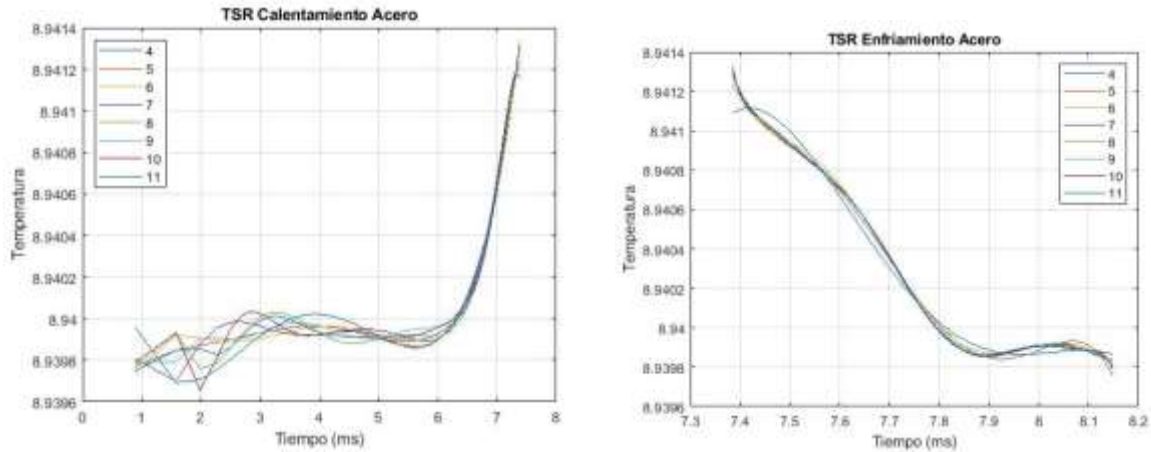


Figura 35: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento con diferentes grados polinómicos para una muestra de acero

Los materiales que se utiliza para el estudio son no homogéneos, por lo que los grados de polinomio de orden 4, 5 y 6 no son ideales para interpretar el comportamiento del material porque, si se observa en las figuras anteriores, las curvas de los grados mencionados son suaves y filtran información valiosa para determinar el espesor del caucho. A partir de grado de polinomio de orden 7 para adelante, se observan discontinuidades a lo largo de la recta, esto puede significar la respuesta de los materiales a la excitación del láser y al enfriamiento. Tomando en cuenta del artículo publicado [46, 47], se utilizará el grado de polinomio 11, porque se observa mejores resultados con el uso del TSR clásico, el cual se implementa en este trabajo.

Las curvas de calentamiento y enfriamiento desde el punto J0 hasta el punto J5 tienen un comportamiento similar comparado con la respuesta del acero (figura 35). Las diferencias que se presenta, se evidencia la respuesta del caucho, además de la presencia de aire (en el caso de los puntos J2 y J4) o por capas adicionales en la pieza (en el caso de los puntos J1 y J5). En los puntos J6, J7 y J8, el único parámetro analizado es el proceso de enfriamiento, al comparar con la respuesta del acero se verifica que tienen un comportamiento distinto, ya que en los puntos se tiene una caída repentina y se estabiliza a una cierta temperatura. Por tanto, los puntos J6, J7 y J8 se descartan para la obtención del espesor del caucho, debido a la respuesta diferente que entrega y la imposibilidad de interpretación de la figura 27.

En la figura 36, se presenta las diferentes respuestas de los puntos de la figura 23 (sin incluir los puntos J6, J7 y J8), incluyendo la respuesta del acero. Las figuras presentadas están normalizadas a 1, para obtener una mejor comparativa entre las respuestas. Si se observa la recta del acero, es casi constante en el valor en 1, pero el momento de que se incluye una capa de caucho esta

respuesta cambia, en el cual se identifica con la excitación láser puntual a diferentes posiciones de la pieza, tanto en calentamiento como en enfriamiento. Un caso curioso es en la posición J3, en el cual hay una percepción que hay una mayor separación con la respuesta del acero, pero si se identifica la temperatura hay una diferencia de 0.012 con respecto al acero por lo que la separación es menor, además, si se observa desde la figura 25 hasta la 27, se evidencia que el punto J3 hay una mayor diferencia entre la temperatura mínima con la temperatura máxima a diferencia de las otras posiciones por lo que se visualiza una mayor diferencia del punto J3 en la figura 36.

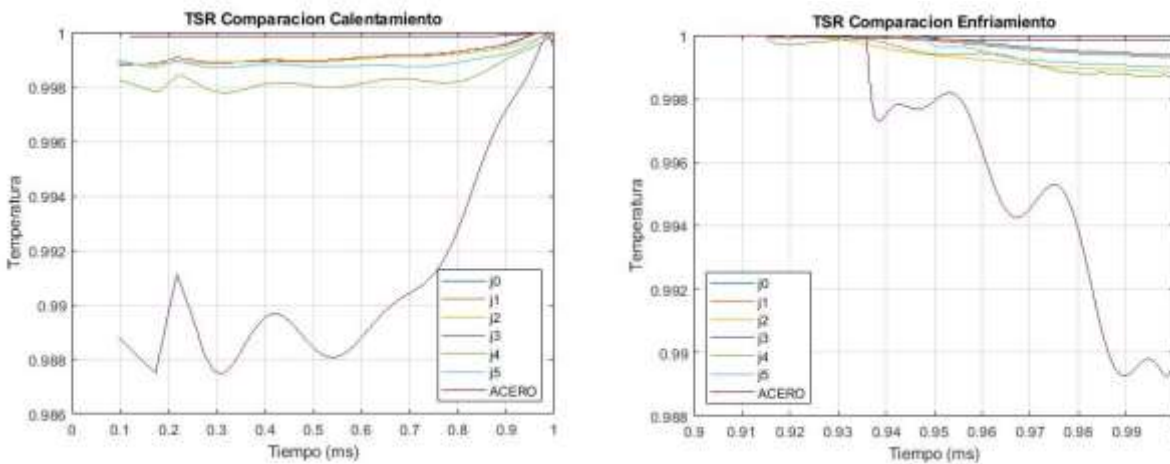


Figura 36: Comparación entre las medidas en los puntos de la pieza y acero en la parte de calentamiento y enfriamiento, con un grado de polinomio 11, normalizado a 1.

Luego de verificar el comportamiento diferente de la estructura sándwich con el acero, se procede un análisis individual de las posiciones estudiadas. En las figuras 37, 38, 39, 40, 41 y 42, se presentan los resultados del método TSR en los puntos J0, J1, J2, J3, J4 y J5; con un grado de polinomio de orden 11, en las respuestas de calentamiento y enfriamiento.

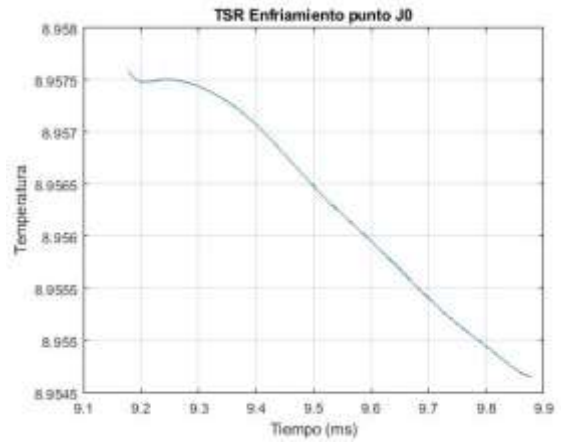


Figura 37: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J0

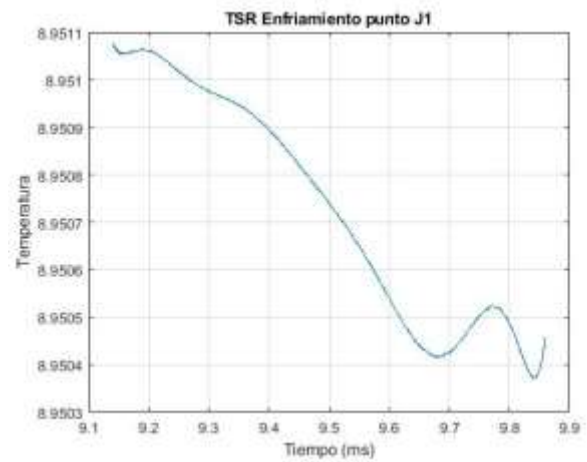
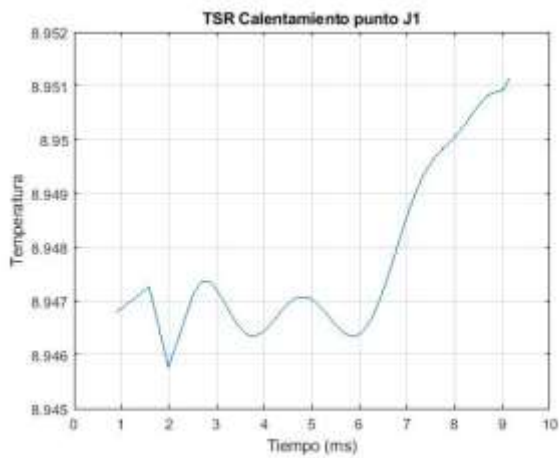


Figura 38: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J1

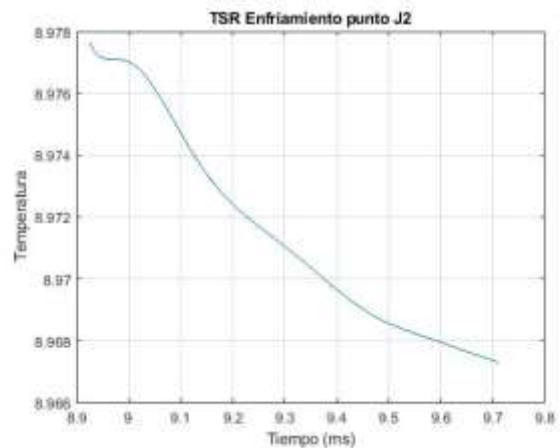
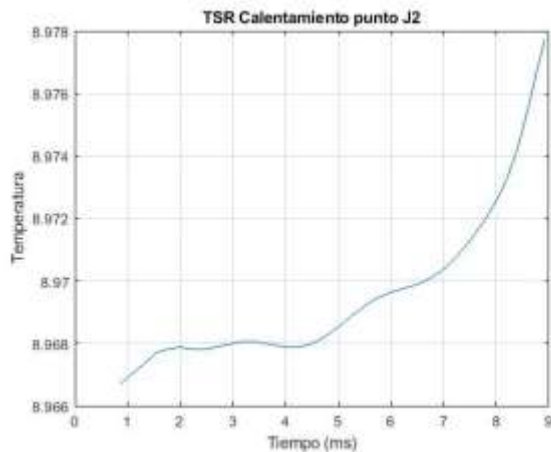


Figura 39: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J2

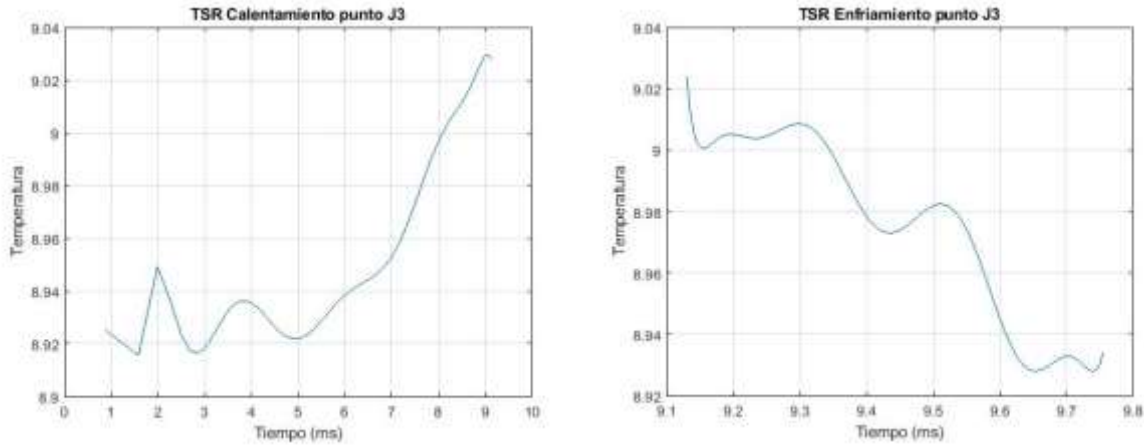


Figura 40: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J3

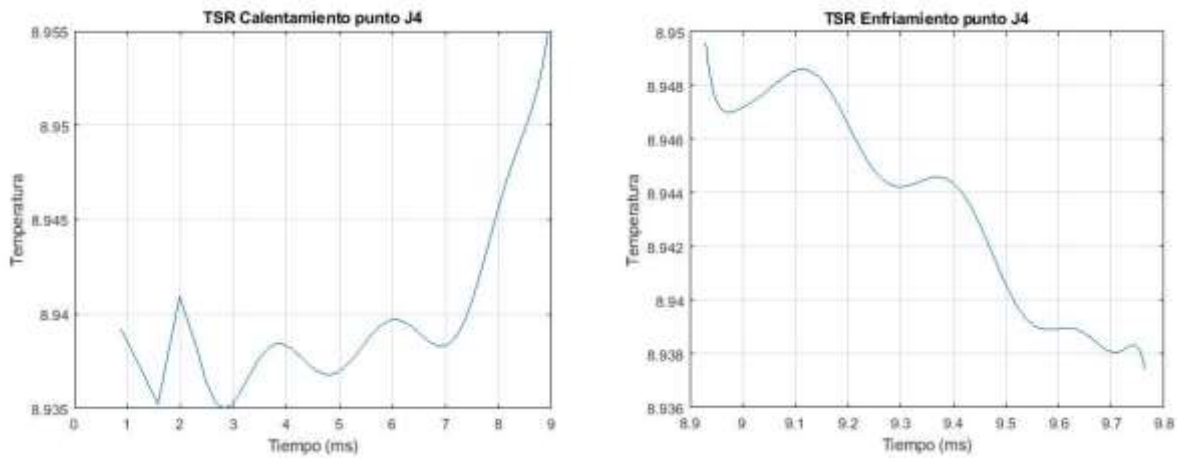


Figura 41: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J4

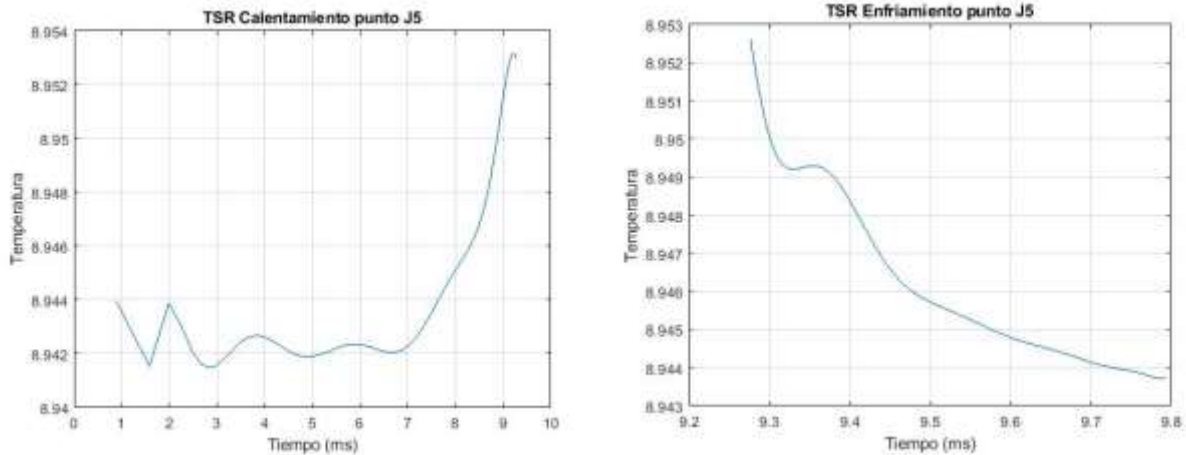


Figura 42: Procesado TSR a las curvas de calentamiento y enfriamiento de grado polinómico de orden 11 para el punto J5

Con las figuras presentadas, en los siguientes puntos se realiza un análisis de cada respuesta. Cabe destacar, que el presente proyecto se centrará en la parte de enfriamiento porque se tiene una interpretación más evidente entre la respuesta del metal y del caucho. Se recomienda para futuras investigaciones relacionadas con el trabajo, verificar a más detalle el comportamiento de los materiales al calentamiento.

Se presentan el siguiente análisis de cada punto, cabe recalcar que cada punto estudiado en meramente interpretativo:

- Para la posición J0, se observa una pequeña bajada, esto significa la respuesta del metal al enfriamiento, luego se observa cómo se mantiene constante a una cierta temperatura, lo que indica que el calor pasa al caucho ya que la salida del calor es más lento con este material. Finalmente se presenta una caída que es paralela a la respuesta del enfriamiento del metal analizada del principio, por lo tanto el calor paso del caucho al metal.
- Para la posición J1, se tiene el mismo comportamiento presentado en la posición J0, pero este punto tiene 5 capas (figura 23), por tanto la discontinuidad mostrada al final de la gráfica es la respuesta del caucho, y al tener una respuesta lenta a la salida del calor, se tiene un calentamiento, pero al dar paso al metal tiene una caída repentina. La última subida es la presencia del aire.
- Para la posición J2, se tiene el mismo comportamiento que la posición J0.
- Para la posición J3, la caída es la respuesta del metal y se mantiene casi constante a una temperatura y después se tiene el paso de calor del caucho al metal, como se analizó

en las anteriores posiciones, pero se tiene una subida en la cual se interpreta que hay paso de calor del metal a aire y nuevamente tiene una caída repentina.

- Para la posición J4, tiene un comportamiento similar a la posición J3, pero la diferencia es el paso del calor desde el metal al caucho. Mientras el punto J3 se mantiene constante, la ubicación J4 tiene una subida repentina, esto puede ser debido a la presencia de dos materiales que son el caucho y el aire. Si se observa la figura 23, esta posición hay la probabilidad de capturar la respuesta térmica del aire.
- Para la posición J5, tiene un comportamiento similar a las posiciones J0 y J2.

Con el análisis presentado, se puede deducir el espesor del caucho, pero para facilitar mejor la interpretación y la medición se debe aplicar las derivadas a las figuras resultantes, porque los máximos y mínimos que se obtengan con la operación, brindará la información de la respuesta de los materiales puestos en prueba.

4.2.2 Aplicación de Derivadas a los Resultados Provenientes del TSR

Las figuras 37 al 42 se presentan tiempos críticos, el cual se evidencia algún mínimo o máximo a lo largo de las rectas. Al aplicar las derivadas, se encontrarán mínimos y máximos, pero para que se tome en cuenta para la medición del espesor del caucho, la recta debe pasar en 0 por la ley de derivadas para encontrar un máximo y un mínimo. En las figuras 43, 44, 45, 46, 47 y 48, se presenta la primera derivada a los polinomios resultantes provenientes del procesado TSR.

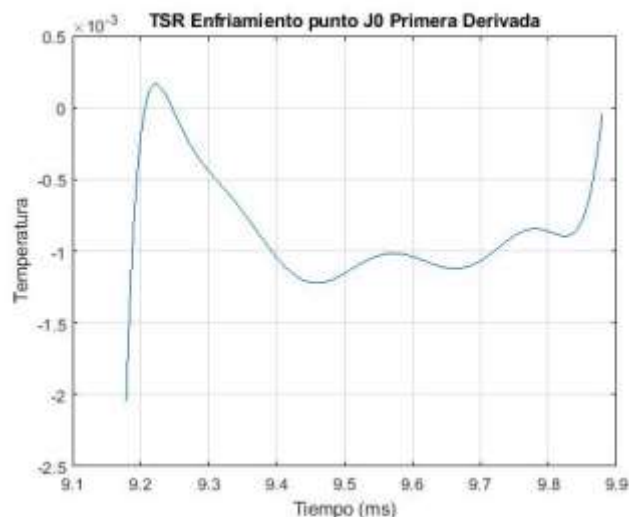


Figura 43: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J0

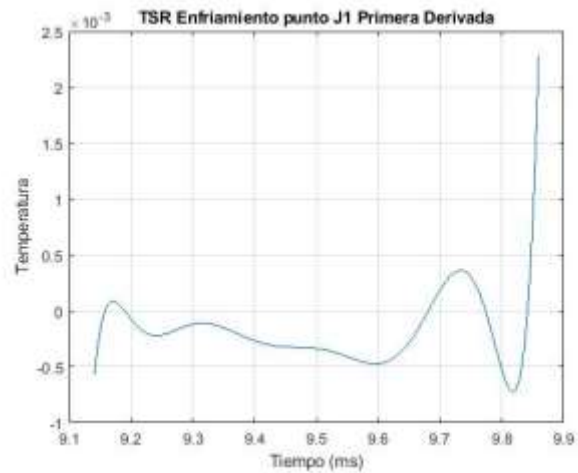


Figura 44: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J1

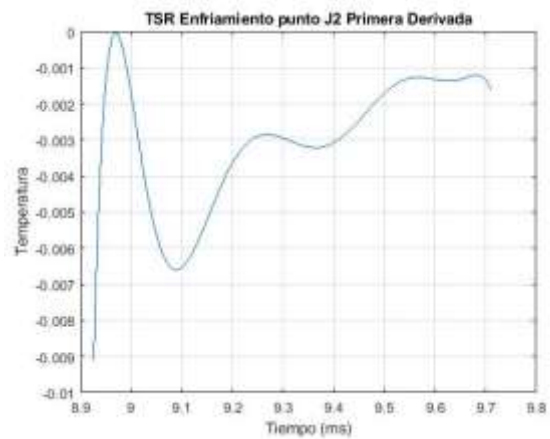


Figura 45: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J2

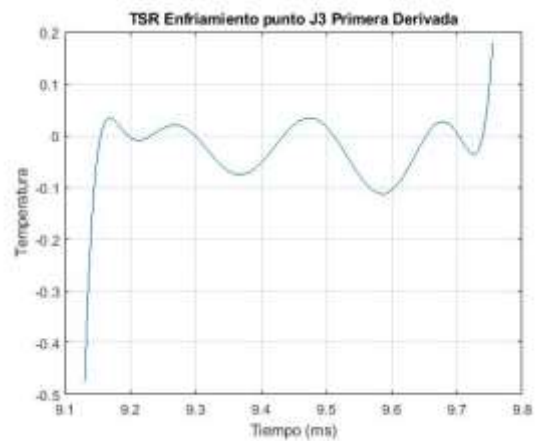


Figura 46: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J3

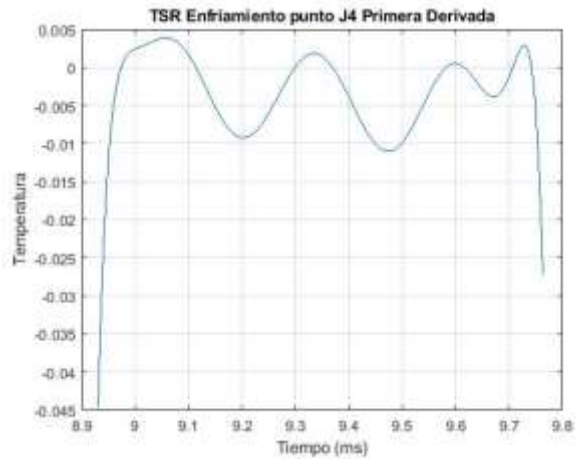


Figura 47: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J4

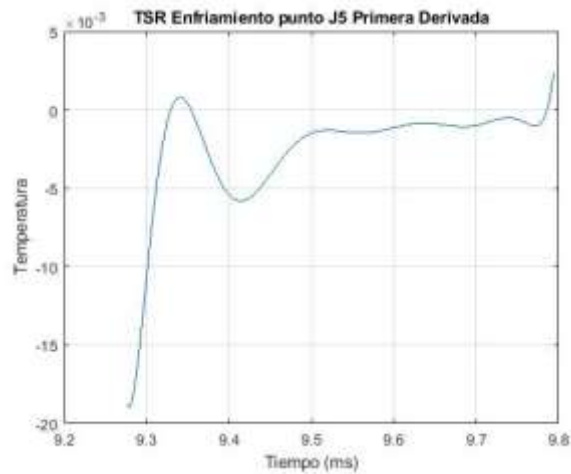


Figura 48: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J5

Como se observa en las figuras anteriores, se evidencia máximos y mínimos por lo que se identifica el comportamiento de los materiales al enfriamiento. Un caso curioso es en la posición J2, ningún valor pasa sobre el eje 0, por tanto no es posible realizar un análisis posterior, tampoco determinar el espesor del caucho. La razón del descarte, es que si la gráfica de derivada si no pasa por el eje 0, esto significa que no se tiene tiempos críticos por ende no se identificará los máximos y mínimos.

La primera respuesta que se observa en los puntos, es un máximo relativo en el cual representa la respuesta del metal al enfriamiento, después se observa el mínimo que representa la respuesta del caucho. Por tanto, se debe extraer el tiempo inicial y final del primer mínimo para verificar el espesor del caucho. En la tabla 6, se identifica los tiempos del primer mínimo relativo.

Tabla 6: Tiempos de máximo relativos de los puntos de la pieza de estructura tipo sándwich

| Posición | Tiempo Inicial (ms) | Tiempo Final (ms) |
|----------|---------------------|-------------------|
| J0 | 9.22671 | 9.56621 |
| J1 | 9.17300 | 9.31422 |
| J3 | 9.17098 | 9.26328 |
| J4 | 9.06143 | 9.32640 |
| J5 | 9.34354 | 9.51242 |

Con los tiempos identificados se procede, en primer lugar, a realizar la segunda derivada al polinomio resultante, porque es un gran indicador para obtener las respuestas de los materiales. Si la segunda derivada obtiene un máximo, un valor menor a 0, se entiende el paso del calor desde el metal al caucho pero si se obtiene un mínimo, un valor mayor a 0, el comportamiento es viceversa. En las figuras 49, 50, 51, 52 y 53 se muestra las gráficas resultantes de la segunda derivada y se identifica los tiempos de la tabla 6, el cual se extrae el signo, que se muestra en la tabla 7.

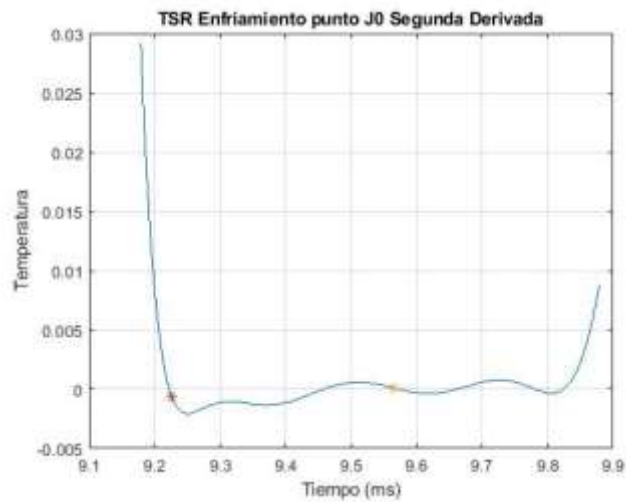


Figura 49: Segunda derivada a la curva de enfriamiento de la posición J0

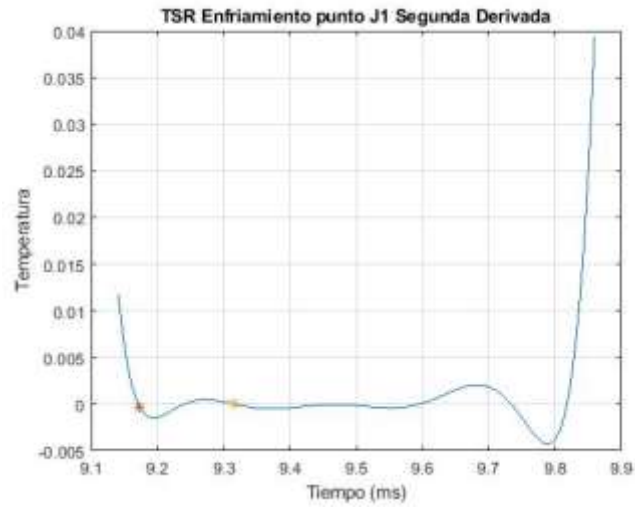


Figura 50: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J1



Figura 51: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J3

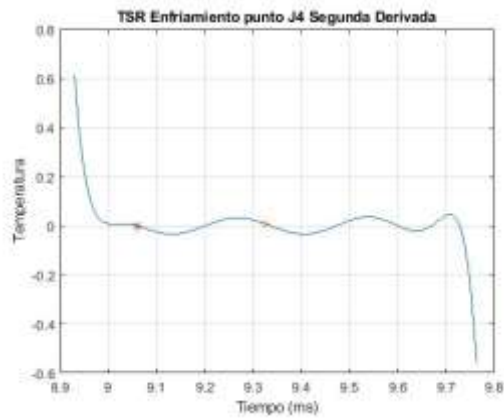


Figura 52: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J4

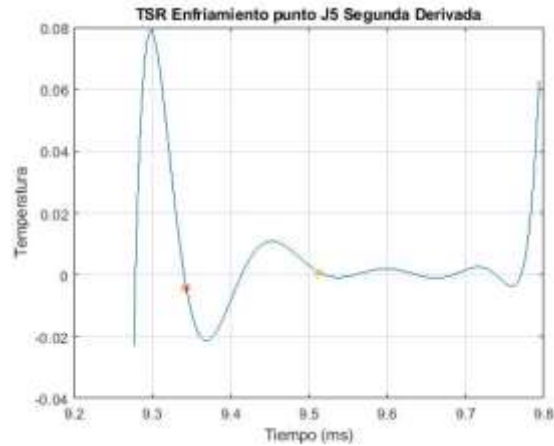


Figura 53: Primera derivada a la curva de enfriamiento de la posición J5

Tabla 7: Máximos y mínimos de los tiempos seleccionados según los resultados de la segunda derivada

| Posición | Tiempo Inicial (ms) | Signo | Tiempo Final (ms) | Signo |
|----------|---------------------|----------|-------------------|----------|
| J0 | 9.22671 | Negativo | 9.56621 | Positivo |
| J1 | 9.17300 | Negativo | 9.31422 | Positivo |
| J3 | 9.17098 | Negativo | 9.26328 | Positivo |
| J4 | 9.06143 | Negativo | 9.32640 | Positivo |
| J5 | 9.34354 | Negativo | 9.51242 | Positivo |

Si se observa las columnas de signo en la tabla 7, se deduce que las medidas que se extrae de la primera derivada son correspondientes al caucho, por lo que se puede realizar la medida del grosor correspondiente al material.

4.2.3 Medida del Espesor del Caucho

Los tiempos de las tablas 6 y 7, son sus logaritmos, por lo tanto se debe transformar estos valores en tiempos reales. En la tabla 8, se presenta los tiempos reales y una diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial, la diferencia será la responsable para obtener el espesor del caucho.

Tabla 8: Tiempos reales y la diferencia entre ellos

| Posición | Tiempo Inicial (ms) | Tiempo Final (ms) | Diferencia de tiempo (ms) |
|----------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| J0 | 10174.1961 | 14274.2144 | 4100.0183 |
| J1 | 9633.4818 | 11094.6690 | 1461.1872 |
| J3 | 9614.0418 | 10543.6599 | 929.6181 |
| J4 | 8616.4634 | 11230.6284 | 2614.1650 |
| J5 | 11424.7805 | 13526.6893 | 2101.9088 |

Con la diferencia de tiempo, se aplicará a la siguiente ecuación para encontrar el espesor de un material:

$$espesor = \sqrt{D * \frac{t}{1000}} \quad (9)$$

Donde la D es la difusividad, con unidades mm^2s^{-1} y t es la diferencia de tiempo de la tabla 8, en el cual se convierte de milisegundos a segundos.

No se tiene certeza que compuestos adicionales tiene el caucho dentro del tambor de la suspensión neumática, por tanto se utilizará el valor más alto de difusividad del caucho el cual es valor es $0.13 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$. Aplicando la fórmula, se obtiene el espesor de caucho, en el cual se observa en la tabla 9 de cada posición seleccionada de la pieza en estudio.

Tabla 9: Espesor del caucho en cada posición estudiada

| Posición | Espesor del caucho (mm) |
|----------|-------------------------|
| J0 | 0.7301 |
| J1 | 0.4358 |
| J3 | 0.3476 |
| J4 | 0.5830 |
| J5 | 0.5227 |

Como se observa la tabla 9, el caucho de la pieza mide menos de un milímetro, en el cual dependiendo la posición se obtiene mediciones distintas.

Con los datos resultantes, se calcula la varianza y desviación típica para la obtención el espesor de caucho promedio para toda la pieza en conjunto con el error. El resultado es el siguiente:

$$espesor = 0.5238 \pm 0.0583 \text{ mm}$$

4.3 Discusión de Resultados

En este apartado se analizará todo el proceso que se desarrolló para obtener el espesor del caucho y como los resultados parciales contribuyeron a alcanzar al objetivo final. Se detallará los inconvenientes en el proceso de medida que influyeron de manera negativa.

La excitación puntual láser, contribuyó a obtener respuestas de la pieza en sus diferentes capas, porque en el punto láser concentra una gran energía, y utilizando pulsos escalonados, contribuyó a que el calor se expande todo el metal y esta pasa al caucho. Las señales infrarrojas que emitía la pieza al ser expuesta a una excitación, fueron capturadas por la cámara termográfica que facilitó el trabajo de análisis, de forma preliminar, la respuesta de la pieza. Se mencionó que el inconveniente de la excitación puntual es que se distribuye en una pequeña área, por lo que se debía realizar varias excitaciones puntuales para cubrir toda el área de estudio, estas medidas

tiene un inconveniente, porque se debe reposicionar la cámara y el láser para obtener las señales infrarrojas de las posiciones deseadas.

Una vez capturado las señales infrarrojas, el software "MPS 5" transforma las señales capturadas en termogramas, que permitió analizar de forma preliminar la respuesta del material a la excitación de la fuente y al enfriamiento. La razón por la que se configuró la cámara para realizar una captura de 25000 fotogramas, es que los pulsos no son consistentes en el mismo punto de prueba, quiere decir que no tienen una forma similar a la anterior, esto se observa en las figuras del 25 al 27, por tanto fue necesario una cantidad enorme de imágenes para obtener varios pulsos, para luego obtener un pulso promedio en el cual indica un comportamiento más real de la pieza en estudio. En la captura de las señales infrarrojas, se presenciaron inconvenientes que afectó de manera negativa al proceso de obtención del espesor del caucho, ya que el ruido de la cámara no permitió generar los pulsos completos en algunas posiciones estudiadas, en el cual se resignó a analizar un solo pulso, en el caso del punto J1, o analizar la parte de enfriamiento, en el caso de los puntos J6, J7 y J8. Otro inconveniente, es la memoria limitada de la central CPU para procesar las señales infrarrojas, esto resulta una cantidad de termogramas limitadas para analizar, esto es un problema porque se necesita una mayor cantidad de pulsos a analizar para tener un comportamiento más real de los materiales en estudio.

La respuesta termográfica del material del acero fue muy importante para realizar el proceso de medición, porque es un indicador de que si el calor se propaga del metal al caucho, parámetro importante tomando en cuenta que la pieza completa es un sistema cerrado. Aplicando el procesamiento TSR al promedio de pulsos y las medidas de acero, se obtiene una diferencia entre ellos (figura 36), con la normalización, se muestra que el acero tiene un valor casi constante en uno y se visualiza una caída en los puntos respecto del acero, por tanto nos indica la presencia de una capa adicional en el material. Con las medidas del acero también ayudó a descartar por completo las posiciones J6, J7 y J8 del análisis posterior y de la medición del caucho, porque si se compara de forma individual no tienen formas parecidas (comparar las figuras 34 y 35) en la parte de enfriamiento, ya que en las posiciones mencionadas tiene una bajada repentina y luego rápidamente se estabiliza a una temperatura, lo que es totalmente diferente al comportamiento del acero.

La selección del grado de polinomio es importante porque nos entrega información valiosa para su posterior estudio, también puede ser causante en filtrar la información. Se verifica que con grados de polinomio menores a 7, la curva está filtrada en el cual no se identifica la presencia de un material externo al acero, pero grados mayores a 7 se presentan discontinuidades a lo

largo de la recta en el cual nos provee la información del comportamiento del acero y el caucho. Al aplicar un TSR clásico, se recomienda utilizar el grado de polinomio 11 para el posterior análisis, según [46, 47], porque si se desea derivadas precisas se debe ajustar a un grado de polinomio alto, en el cual se demuestra, empíricamente, que el grado 11 tiene un nivel alto satisfactorio.

Al aplicar TSR con grado de polinomio de orden 11, se presentan las figuras del 37 al 42, en la cual fue analizado cada uno. Lo que se destaca de las curvas resultantes es la respuesta de los materiales involucrados. El trabajo se centra en la interpretación de la parte de enfriamiento de la respuesta de la pieza, porque se identifica visualmente las respuestas del acero y el caucho, en cambio en la parte de calentamiento se recomienda realizar un paso extra para identificar los materiales, por tanto el trabajo se basa en la parte de enfriamiento.

Según la interpretación de las gráficas, el acero al tener valores mayores de conductividad y difusividad, en la parte de enfriamiento, tiene una respuesta rápida, esto quiere decir una caída repentina pero en un tiempo la respuesta se vuelve lenta, donde se tiene una subida o se mantiene constante a una temperatura, esto es debido a la presencia del caucho donde su respuesta lenta es debido a los valores bajos de conductividad y difusividad, aunque estas respuestas también pueden ser debido al aire en el cual es más lento que el metal. Con estas interpretaciones, se tiene la posibilidad de deducir los tiempos en el que el calor pasa por el caucho, pero la primera y segunda derivada contribuyen enormemente al análisis de la pieza, porque indican el comportamiento del acero y caucho mediante máximos y mínimos relativos respectivamente. Con los mínimos relativos ya expuestos, se tiene una fácil interpretación del comportamiento de la pieza y es posible identificar los tiempos inicial y final del mínimo, ya que con estos valores permitirán calcular el grosor del caucho. Con la segunda derivada, se comprobó que los tiempos seleccionados pertenecen al mínimo, por tanto se confirma que el mínimo relativo estudiado pertenece al caucho.

Aplicando la ecuación (9), se obtiene el espesor del caucho en las posiciones seleccionadas, en donde los resultados son menores a 1 mm. Además, el promedio de los puntos con su respectivo error relativo es 0.5238 ± 0.0583 mm. El espesor dentro de la estructura tipo sándwich es aproximadamente entre 3 a 4 mm, esto quiere decir que hay una diferencia entre 2.4762 y 3.4762 mm, aunque el valor resultante se acerca, no es una lectura correcta del espesor. La lectura incorrecta puede deberse a estos siguientes factores:

- Los tiempos de calentamiento y enfriamiento no fueron los adecuados
- El ruido de la cámara modificó las señales infrarrojas capturadas

- La potencia láser no fue suficiente para alcanzar la última capa del metal.
- Si se observa la figura 9, al utilizar el pulso escalonado existe la probabilidad que dificultó la caracterización cuantitativa (identificación de la profundidad)

Lo que se destaca de los resultados obtenidos, es que con termografía activa infrarroja se puede detectar la presencia de caucho en una estructura tipo sándwich. Los resultados de la tabla (9), probablemente indiquen la unión del acero y caucho en la estructura, debido a sus valores pequeños por lo que, se debe contactar con el fabricante del tambor de la suspensión neumática para obtener una referencia y comparar con los resultados obtenidos.

5 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Aunque los resultados no fueron satisfactorios, se pudo comprobar que el método de la termografía activa infrarroja funciona para las estructuras tipo sándwich porque se comprobó la presencia del caucho, capturando las medidas enfocando la parte de acero de la estructura en un sistema cerrado. El trabajo fue de interpretación, tomando en cuenta las referencias de fundamentos de calor de manera teórica de los materiales estudiados, el cual permitió el análisis del comportamiento del acero y el caucho en enfriamiento. El procesado TSR ayudó a fortalecer el análisis porque los polinomios resultantes confirmaron el comportamiento tanto del acero como del caucho. Los resultados del TSR con la aplicación de la primera y segunda derivada refuerza la interpretación previa de la presencia de los materiales de acero y caucho, mediante los primeros máximos y mínimos relativos provenientes de la respuesta de los puntos estudiados de la pieza, por tanto el algoritmo TSR es efectivo en encontrar capas adicionales en una pieza de un sistema cerrado. Pero tener cuidado con las interpretaciones, porque después de la interpretación del primer máximo y mínimo relativo, se dedujo, después de la respuesta del caucho, que se tiene una respuesta del metal ya que la pendiente era paralela a la primera respuesta del mismo material, pero esto fue incorrecto debido a los resultados de la tabla (9), por tanto desde la respuesta del caucho se debe realizar un paso extra confirmando la presencia del metal o alguna composición extra que incluye el caucho.

Los resultados de la tabla (9) no son totalmente insatisfactorios porque estos resultados posiblemente indiquen la unión entre el acero y caucho, en el cual se debe realizar estudios posteriores para su confirmación.

Finalmente, a pesar de no cumplir con el objetivo principal, el trabajo presente sirve como base para futuras mediciones mediante el método de termografía activa infrarroja, porque este

documento es la primera en su tipo en mediciones de materiales mediante termografía en sistemas cerrados. Con el esquema detallado para la realización de las medidas y el procedimiento a realizar, está puesta a disposición para optimizar, discutir o ampliar el trabajo presentado. Por tanto, el presente documento será una ayuda para futuros trabajos de este estilo.

Por último, en los siguientes puntos se menciona una lista de elementos para optimizar o ampliar el trabajo presente para futuros trabajos, las cuales son:

- Realizar un estudio completo en la parte de calentamiento, porque puede encontrar información extra que no se presencié en la parte de enfriamiento.
- Utilizar una fuente de excitación láser lineal, porque entrega una gran cantidad de puntos a analizar, siempre y cuando la distribución de potencia sea uniforme.
- Realizar una excitación a la pieza con láser de más alta potencia, para reducir tiempos en los pulsos, donde el promedio de pulsos será más ajustado.
- En caso de continuar con la fuente de excitación láser puntual, realizar varias medidas en una misma posición para evitar que el ruido o fuentes externas alteren el proceso.
- Analizar las medidas del acero y caucho, para obtener una medida real antes de realizar un procesamiento a la respuesta de la pieza en estudio.
- Aplicar termografía activa infrarroja en otras piezas para evaluar la efectividad de este método.
- Aplicar un análisis extra al algoritmo TSR para una mejor interpretación de las señales resultantes.
- Comparar entre la termografía pulsada y escalonada de manera empírica, el comportamiento de un objeto en sistema cerrado, para verificar qué método es el más efectivo.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. **Mundo Motor.** Suspensión Neumática: Cómo Funciona, Componentes, Tipos y Más. [En línea] Mundo Motor. <https://www.mundodelmotor.net/suspension-neumatica/>.

2. **THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING.** INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING. [En línea] THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx..

3. **Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND).** Formación AEND. [En línea] Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND), 2014. <https://www.aend.org/formacion.php>.

4. **Bosom, Pablo Venegas.** Termografía Infrarroja. Métodos Matemáticos para Caracterización de Defectos en Materiales Compuestos mediante Termografía Activa. Madrid : s.n., 2019.
5. **Lohith K S, Mahesh.** *Ultrasonic Non Destructive Testing*. . 2009.
6. **EXPLORE the WORLD of PIPING (EWP).** Non destructive testing. *Ultrasonic Testing*. [En línea] Werner Sölken. http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html.
7. *A study of the transmission of ultrasound across solid-rubber interfaces.* **Drinkwater, Bruce, Dwyer-Joyce, Rob y Cawley, Peter.** s.l. : Journal of The Acoustical Society of America- J ACOUST SOC AMER, 1997. 101. 970-981. 10.1121/1.418055. .
8. *Ultrasonic Testing for Vulcanization Inspection of Natural Rubber.* **Seenawat, Mongkol, Prateepasen, A. y Jomdecha, Cherdpong.** s.l. : American Society of Mechanical Engineers, 2003. NDE. 24. 10.1115/IMECE2003-41782.
9. **Mix, Paul E.** *INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING*. New Jersey, United States : John Wiley & Sons, 2005. ISBN-13 978-0-471-42029-3.
10. **Nemeth, Alexandra, y otros.** Optical Coherence Tomography – Applications in Non-Destructive Testing and Evaluation. [En línea] 6 de Marzo de 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/43475>. DOI: 10.5772/53960.
11. *Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical coherence tomography.* **Stifter, D.** s.l. : Appl. Phys. B 88, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00340-007-2743-2>.
12. *OCT for industrial applications.* **Song, Guiju.** 8563, s.l. : Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012. 10.1117/12.2000462.
13. **International Atomic Energy Agency (IAEA).** Industrial radiography. [En línea] International Atomic Energy Agency (IAEA). <https://www.iaea.org/topics/industrial-radiography>.
14. **General Electric Company (GE).** *Industrial Radiography*. s.l. : GE Inspection Technologies, 2006. GEIT-30158EN (06/08).
15. *Non-destructive techniques based on eddy current testing.* **García-Martín, Javier, Gómez-Gil, Jaime y Vázquez-Sánchez, Ernesto.** 3, Valladolid, España : Sensors, 2011, Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
16. *ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUES FOR THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS.* **Ibarra-Castanedo, Clemente, y otros.** 2007. 10.1142/9789812770943_0014. .
17. *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing.* **Usamentiaga, Rubén, y otros.** Basel, Suiza : Sensors, 2014, Vol. 14. 10.3390/s140712305.
18. **Restrepo Girón, Andrés David.** *Contribución a la Solución del Problema de Detección y Caracterización de Defectos en Termografía Activa mediante Procesamiento Espacio-Temporal de Secuencias de Imágenes Infrarrojas*. 2012.
19. *Developing Guidelines for the Use of Passive Thermography on Cultural Heritage in Tropical Climates.* **Kavuru, Manogna y Rosina, Elisabetta.** 23, s.l. : Applied Sciences, 2020, Vol. 10. <https://doi.org/10.3390/app10238411>.
20. **Budzier, Helmut y Gerlach, Gerald.** *Active Thermography*. [aut. libro] Nathan Ida y Norbert Meyendorf. *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. Suiza : Springer, Cham, 2019.
21. *Blackbody and Blackbody Radiation.* **Zwinkels, Joanne.** 2015. 10.1007/978-3-642-27851-8_370-1.
22. *THERMAL CONDUCTIVITY OF INDUSTRIAL MATERIALS.* **Ketheeswaren, Sivapackiyathan.** 2005. 10.13140/RG.2.1.3665.4166..

23. **Tatum, Jeremy.** Thermal Conductivity. *Heat and Thermodynamics*. California, United States : LibreTexts, 2020.
24. **Maldague, Xavier.** *Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing*.
25. **Periodic Table.** Rubber – Density – Strength – Melting Point – Thermal Conductivity. [En línea] Periodic Table. <https://material-properties.org/rubber-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/>.
26. *On thermal diffusivity.* **Salazar, Agustin.** 351, s.l. : European Journal of Physics, 2003, Vol. 24. 10.1088/0143-0807/24/4/353.
27. *Measurement Method of Thermal Diffusivity of the Building Wall for Summer and Winter Seasons in Poland.* **Owczarek, Mariusz, y otros.** 3836, Polonia : Energies, 2021, Vol. 14. <https://doi.org/10.3390/en14133836>.
28. *Thermal diffusivity of rubber compounds.* **Bafnec, M., y otros.** 10, s.l. : Plastics, Rubber and Composites, 1999, Vol. 28. <https://doi.org/10.1179/146580199101540051>.
29. *USE OF PULSED IR THERMOGRAPHY FOR DETERMINATION OF SIZE AND DEPTH OF SUBSURFACE DEFECT TAKING INTO ACCOUNT THE SHAPE OF ITS CROSS-SECTION AREA.* **WYSOCKA-FOTEK, O., MAJ, M. y OLIFERUK, W.** 2, s.l. : Archives of Metallurgy and Materials, 2015, Vol. 60. DOI: 10.1515/amm-2015-0181 ; ISSN 1733-3490.
30. *Experimentally validated defect depth estimation using artificial neural network in pulsed thermography.* **Saeed, Numan, y otros.** s.l. : Infrared Physics & Technology, 2019, Vol. 98. 10.1016/j.infrared.2019.03.014.
31. *Comparison of Pulse Thermography (PT) and Step Heating (SH) Thermography in Non-Destructive Testing of Unidirectional GFRP Composites.* **Kamińska, Paulina, y otros.** s.l. : Fatigue of Aircraft Structures, 2020, Vol. 2019. 10.2478/fas-2019-0009. .
32. *Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography - Part II: experimental validation.* **Roche, Jean-Michel y Balageas, Daniel.** 2014. 10.13140/2.1.1334.7207.
33. *Eddy-current lockin-thermography: Method and its potential.* **Riegert, G., Zweschper, Th. y Busse, G.** Stuttgart, Alemania : J. Phys. IV France, 2005, Vol. 125. <https://doi.org/10.1051/jp4:2005125135>.
34. *Capabilities of Lock-in Thermography for Non-destructive Inspection of Fibre Reinforced Composites.* **Ullmann, Thomas, Shi, Yuan y Aoki, Rodolfo.** 2012. 10.21611/qirt.2012.384.
35. **Reifsnider, K.L., Henneke, E.G. y Stinchcomb, W.W.** The Mechanics of Vibrothermography. [aut. libro] W.W. Stinchcomb. *Mechanics of Nondestructive Testing*. Boston, MA, United States : Springer, 1980.
36. *Experimental Considerations in Vibrothermography.* **Shepard, Steven, Ahmed, Taymur y Lhota, James.** s.l. : Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, Vol. 5405. 10.1117/12.546599.
37. **Elprocus.** What is an IR Sensor : Circuit Diagram & Its Working. [En línea] Elprocus. <https://www.elprocus.com/infrared-ir-sensor-circuit-and-working/>.
38. **FLIR AB.** *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals*. s.l. : FLIR AB.
39. **Axis Communications.** Thermal Cameras. [aut. libro] Axis Communications. *Intelligent Network Video: Understanding Modern Surveillance Systems*.
40. *Infrared Thermography in Equine Practice.* **Čebulj-Kadunc, Nina, Frangež, Robert y Kruljc, Peter.** s.l. : Veterinarska stanica, 2020, Vol. 51. 10.46419/vs.51.2.1.

41. *Principal Component Thermography for Defect Detection in Concrete*. **Milovanović, y otros.** 14, s.l. : Sensors, 2020, Vol. 20. <https://doi.org/10.3390/s20143891>.
42. *Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures*. **Rajic, Nik.** s.l. : Composite Structures, 2002, Vol. 58. 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
43. *Dynamic thermal tomography: Recent improvements and applications*. **Vavilov, Vladimir.** s.l. : NDT & E International, 2015, Vol. 71. 10.1016/j.ndteint.2014.09.010.
44. *Pulse phase thermography for defect detection and visualization*. **Marinetti, Sergio, y otros.** s.l. : NASA.
45. *Extension of the Thermographic Signal Reconstruction Technique for an Automated Segmentation and Depth Estimation of Subsurface Defects*. **Schager, Alexander, y otros.** 96, s.l. : Journal of Imaging, 2020, Vol. 6. <https://doi.org/10.3390/jimaging6090096>.
46. *The thermographic signal reconstruction method: A powerful tool for the enhancement of transient thermographic images*. **Balageas, Daniel, y otros.** s.l. : Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2014, Vol. 35. 10.1016/j.bbe.2014.07.002.
47. *The thermographic signal reconstruction method: a powerful tool for the enhancement of transient thermographic images*. **Balageas, Daniel, y otros.** s.l. : Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2013.
48. *Laser spot thermography of welded joints*. **Reomer, Jakub, Pieczonka, Łukasz y Uhl, Tadeusz.** 2/2014, s.l. : Diagnostyka, 2014, Vol. 15. 1641-6414.
49. *Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings*. **Liu, Zhanwei, y otros.** s.l. : Opt. Express, 2017, Vol. 25. 31789-31800.
50. **Operating Instructions for PSU-H-LED Power Supply.**
51. **Thermosensorik GmbH. Infrared Camera Head CMT 128 SM.** s.l. : Thermosensorik GmbH, 2004.
52. —. **Central unit TS 50.** s.l. : Thermosensorik GmbH, 2004.
53. —. **Software MPS 5.** s.l. : Thermosensorik GmbH, 2004.